CONSILIUL NAȚIONAL
DE PROTECȚIE RADIOLOGICĂ
DIN MAREA BRITANIE

TRĂIM CU RADIAȚII

EDITURA TEHNICĂ

Scanned with OKEN Scanner

Consiliul Naţional de Protecţie Radiologică
din Marea Britanie

TRĂIM CU RADIAŢII

Traducere din limba engleză:
dr. ANDREI IONESCU

Editura Tehnică
Bucureşti — 1989

Scanned with OKEN Scanner

Consiliul Național de Protecție Radiologică

Consiliul Național de Protecție Radiologică a fost creat prin Legea Protecției Radiologice în anul 1970, care a intrat în vigoare la 1 octombrie în același an și se aplică pe întreg teritoriul Marii Britanii.

Scopul urmărit de guvern prin această lege a fost de a stabili un punct de referință oficial pe plan național în materie de protecție radiologică.

Statutul Consiliului prevede următoarele funcții:

— să progreseze, prin cercetare sau în alt mod, în dobîndirea de cunoștințe despre protecția oamenilor împotriva riscurilor radiațiilor;

— să furnizeze informații și sfaturi persoanelor (inclusiv departamentele guvernamentale) din Marea Britanie care au răspunderi în direcția protejării contra riscurilor radiațiilor, atît a comunității ca întreg, cît și a unor sectoare ale ei.

Legea împuternicește Consiliul să presteze servicii tehnice pentru persoanele care se ocupă de riscurile radiațiilor și să încaseze onorariu pentru aceasta. De asemenea organizează cursuri de pregătire.

National Radiological Protection Board
LIVING WITH RADIATION

First published 1973
Second edition 1981
Third edition 1986
Reprinted 1986, 1987

© National Radiological Protection Board, 1987

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Consiliul Național de Protecție Radiologică a fost creat prin Legea Protecției Radiologice din anul 1970 pentru a efectua cercetări și a da consultații și informații în legătură cu protecția radiologică. Pe lîngă faptul că a răspuns numeroaselor anchete în specific, precum și cererilor de studii speciale, Consiliul și-a îndeplinit responsabilitățile de a asigura informații și consultații în multe feluri. Articolele publicate de Consiliu și de membrii săi în literatura științifică au jucat un rol important. Membrii Consiliului sînt încurajați să publice rezultatele muncii lor în revistele de specialitate. Oricînd este posibil, articolele sînt oferite spre publicare în reviste de știință și de tehnică și în volumele de lucrări ale unor conferințe. În plus, Consiliul are seria sa proprie de rapoarte și scurte articole care apar în Buletinul Protecției Radiologice, o publicație proprie.

La diferite nivele au fost organizate cursuri de perfecționare, au existat participări la simpozioane și s-au organizat seminarii pentru necesitățile și interesele unor grupuri specifice ca oameni politici, oficiali, oameni de știință și ziariști.

În anul 1973, Consilul a publicat broșura intitulată „Trăim cu radiații", adresată unui public larg. Aceasta a fost primită suficient de bine pentru ca să încurajeze Consiliul să editeze în anul 1981 o versiune revăzută, iar acum o nouă versiune. Ediția de față, ca și precedentele, își propune ca obiective să indice natura radiațiilor ionizante, sursele și efectele lor, precum și mijloacele de protecție a populației împotriva acestor radiații. Sperăm că cititorii vor fi astfel stimulați să studieze problemele protecției radiologice mai în profunzime.

RICHARD SOUTHWOOD, Membru al Societății Regale, președinte
JOHN DUNSTER, director.

CUPRINS

1. Introducere 5
2. Concepte și mărimi 7
3. Radiația de origine naturală 17
4. Radiația de origine artificială 22
5. Efectele radiațiilor 30
6. Sistemul de protecție radiologică 38
7. Reactorii nucleari 46
8. Deșeuri radioactive 58
9. *Bibliografie* 66
10. *Glosar* 67
11. *Anexa I:* Notații, prefixe, simboluri 73
12. *Anexa II:* Relații între unitățile de radiație vechi și noi 75

Postfață 76

Scanned with OKEN Scanner

1 INTRODUCERE

EXPUNERI LA RADIAȚII ȘI EFECTE

Radiația este un fapt de viață. Ea este prezentă în natură și poate fi produsă artificial. Radiația de origine naturală există în tot mediul înconjurător, pe cînd radiația de origine artificială a fost folosită de cîteva decenii. Radiațiile naturale și artificiale nu sînt diferite nici ca tip, nici ca efect. Termenul *radiație** se referă aici la *radiația ionizantă*, care este de mai multe feluri.

Radiația este inerent dăunătoare omului și, de aceea, populația trebuie protejată față de o expunere inutilă sau excesivă. Cu toate acestea, folosirea radiației contribuie la binele omului — ea este importantă în dezvoltarea medicinei și a altor științe, precum și în industrie.

Efectele radiațiilor care produc cea mai mare îngrijorare sînt bolile maligne provocate persoanelor expuse la radiații, precum și defectele moștenite de descendenții acestor persoane. Probabilitatea apariției oricărui efect provocat de radiație este legată de *doza* de radiație primită. *Riscul* asociat oricărei expuneri trebuie comparat cu beneficiile procedurilor care au provocat expunerea.

În medie, radiația de origine naturală produce expunerea cea mai mare asupra oamenilor. O bună parte din aceasta nu poate fi evitată, deși se poate exercita un anumit control. Expunerea la radiația de origine artificială este mai ușor de controlat. Stringența controlului — balanța dintre risc și beneficiu — este o problemă pe care trebuie să o aprecieze societatea.

SISTEMUL DE PROTECȚIE

Unde se află acul balanței este o problemă a instituțiilor reprezentative, deoarece societatea este aceea care trebuie să suporte cheltuielile. Organizațiile

* Cînd sînt folosiți prima dată, termenii din glosar sînt culeși cu italice (litere înclinate).

Scanned with OKEN Scanner

radiologice pot face recomandări, dar este dreptul guvernelor de a decide asupra acceptării unei anumite practici, precum și a gradului de protecție ce trebuie impus.

Multe țări aplică același sistem de *protecție radiologică*, sistem care cere ca dozele să fie reduse la minim în mod rațional, iar anumite limite să fie respectate. Ca rezultat al acestui sistem, în Marea Britanie utilizarea radiațiilor reprezintă o ocupație relativ sigură, iar sănătatea publică nu este afectată apreciabil de expuneri aventuroase.

NELINIȘTEA PUBLICĂ

Sistemul de protecție radiologică s-a dezvoltat în decursul mai multor decenii și continuă să se dezvolte, dar acum el permite oamenilor să folosească radiația în relativă siguranță. Totuși, trebuie răspuns la întrebarea: de ce radiația provoacă atîta neliniște opiniei publice?

Răspunsurile la întrebare pot fi numai exprimări de opinie. Radiația este o cauză, printre multe altele, a unor boli de care oamenii se tem în mod special. Ea nu poate fi detectată cu simțurile omului. Mai este asociată cu *armele nucleare*. Oricare dintre acești factori pot amplifica neliniștea populației și astfel să producă o sensibilizare mai puternică în legătură cu daunele decît cu binefacerile utilizării radiației. Neliniștea se poate datora și unei lipse de informare sau unei interpretări răuvoitoare.

De aceea, în această broșură sînt descrise sursele și efectele radiației ionizante și sînt explicate principiile și practica protecției radiologice. Sînt examinate și cîteva chestiuni privind *energetica nucleară*, dar armele nucleare nu sînt luate în considerare, cu excepția *căderilor radioactive*.

Informația prezentată aici poate ajuta marele public să aprecieze semnificația expunerii la radiații, atît pentru persoane individuale cît și pentru comunitate. Ea poate, de asemenea, să ne sugereze să trăim împreună cu radiația într-o manieră prudentă, dar nu temătoare.

Scanned with OKEN Scanner

2 CONCEPTE ȘI MĂRIMI

STRUCTURA MATERIEI

Toată materia se compune din *elemente* cum ar fi hidrogenul, litiul, carbonul, oxigenul, plumbul ș.a. Elementele constau din *atomi* caracteristici, care conțin un *nucleu* relativ mic și un anumit număr de *electroni*. Nucleul conține *protoni*, care au sarcină electrică pozitivă și *neutroni*, care nu au sarcină electrică. Electronii au sarcină negativă și pot fi imaginați ca înconjurînd nucleul, cel mai adesea în cadrul unor pături cu frontiere nedefinite. Atomii constituie structuri relativ goale; diagramele simbolice, cum ar fi aceea a litiului (fig. 1), nu pot să exprime pe deplin acest lucru.

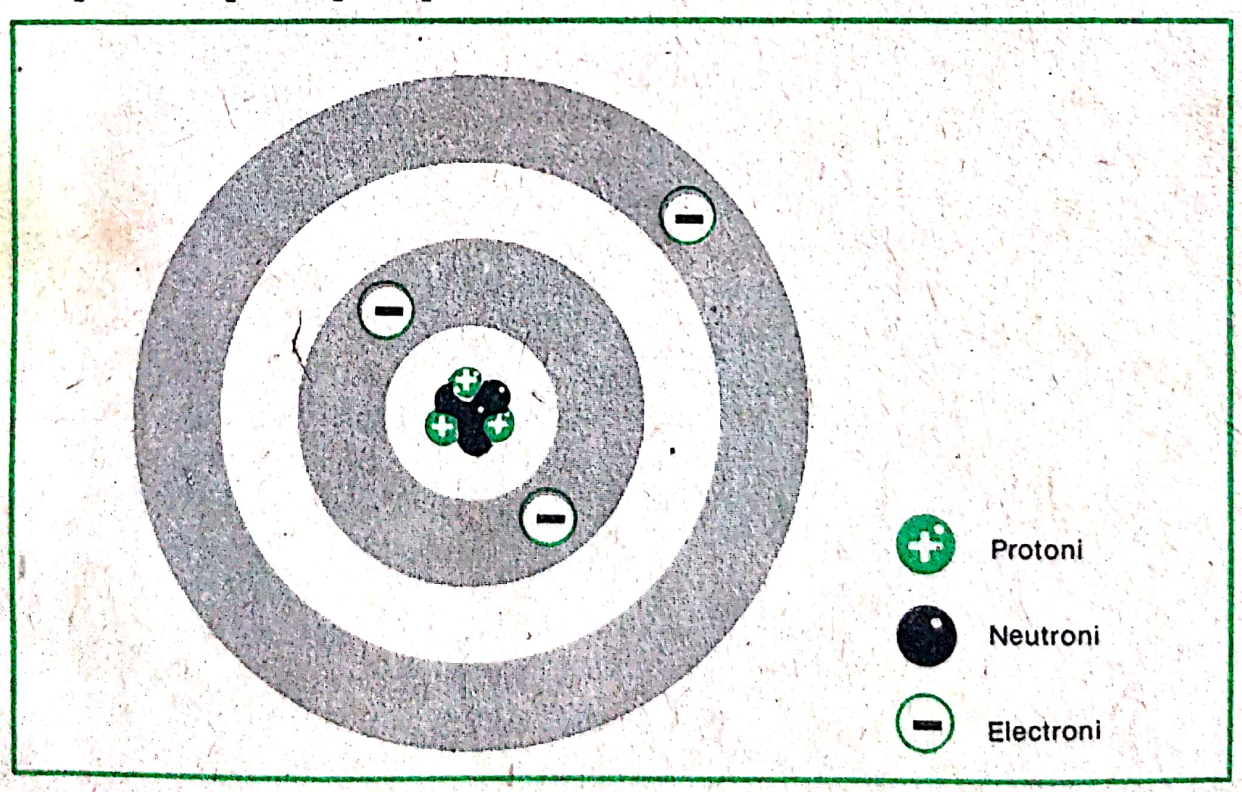


Fig. 1. Diagrama simbolică a atomului de litiu.

Scanned with OKEN Scanner

Un atom conține un număr egal de protoni și de electroni și este neutru din punct de vedere electric. Numărul protonilor, numit și *număr atomic*, este cel ce caracterizează un element: numărul atomic al litiului de exemplu, este 3, iar al oxigenului 8. Atomii elementelor de același fel sau de elemente diferite se pot combina pentru a forma entități neutre electric numite *molecule:* astfel, 2 atomi de oxigen formează o moleculă de oxigen, iar 2 atomi de hidrogen se combină cu un atom de oxigen pentru a forma o moleculă de apă.

Masa atomului este concentrată practic în nucleu, iar numărul de protoni plus neutroni din acesta se numește *număr de masă*. Cele mai multe specii de atomi se pot caracteriza prin numărul atomic și numărul de masă sau pur și simplu prin numele elementului și numărul de masă: astfel caracterizați ei se numesc *nuclizi*. Litiul-7, după cum arată diagrama, este un nuclid cu trei protoni — numărul atomic unic al elementului litiu, plus — 4 neutroni. Carbonul-12 este un nuclid cu 6 protoni plus 6 neutroni. Plumbul-208, alt exemplu, este un nuclid cu 82 protoni plus 126 neutroni.

Nuclizii unui element ce au numere diferite de neutroni se numesc *izotopi* ai acelui element. Hidrogenul, de exemplu, are trei izotopi: hidrogen-1, hidrogen-2 numit deuteriu, hidrogen-3 numit tritiu. Fierul are zece izotopi, de la fier-52 pînă la fier-61. Cîteodată, termenul de izotop este folosit incorect ca sinonim al nuclidului.

Protoni + neutroni:	**Nucleu**
Nucleu + electroni:	**Atom**
Atomi combinați:	**Moleculă**
O specie de atom:	**Nuclid**
Număr egal de protoni:	**Izotop**

RADIOACTIVITATE ȘI RADIAȚIE

Anumiți nuclizi sînt stabili, dar mulți nu. Stabilitatea unui nucleu este dată de numerele de neutroni și de protoni, de configurația lor, precum și de forțele pe care le exercită unii asupra altora. Un nuclid instabil se transformă în mod spontan în nuclidul altui element și, făcînd aceasta, emite radiație. Această proprietate se numește *radioactivitate*, transformarea se cheamă *dezintegrare*, iar nuclidul se zice că este un *radionuclid*. De exemplu, carbonul-14 este un radionuclid care se dezintegrează în azot-14, un nuclid stabil. Bariul-140 este un radionuclid care se dezintegrează în radionuclidul lantan-140 care, la rîndul său, se dezintegrează în nuclidul stabil ceriu-140. Plumbul-210

Scanned with OKEN Scanner

este un radionuclid care se dezintegrează prin seria prezentată în diagrama din fig. 2, ultimul *produs de dezintegrare* fiind un izotop stabil al plumbului. Dintre cei vreo 1700 nuclizi cunoscuți, circa 280 sînt stabili.

Radionuclizi:	Nuclizi instabili
Radioactivitate:	Emisie de radiații
Radiații:	α, β, γ, n, radiații X
Activitate:	Rata de dezintegrare a unui radionuclid
Timp de înjumătățire:	Timpul în care activitatea scade la jumătate

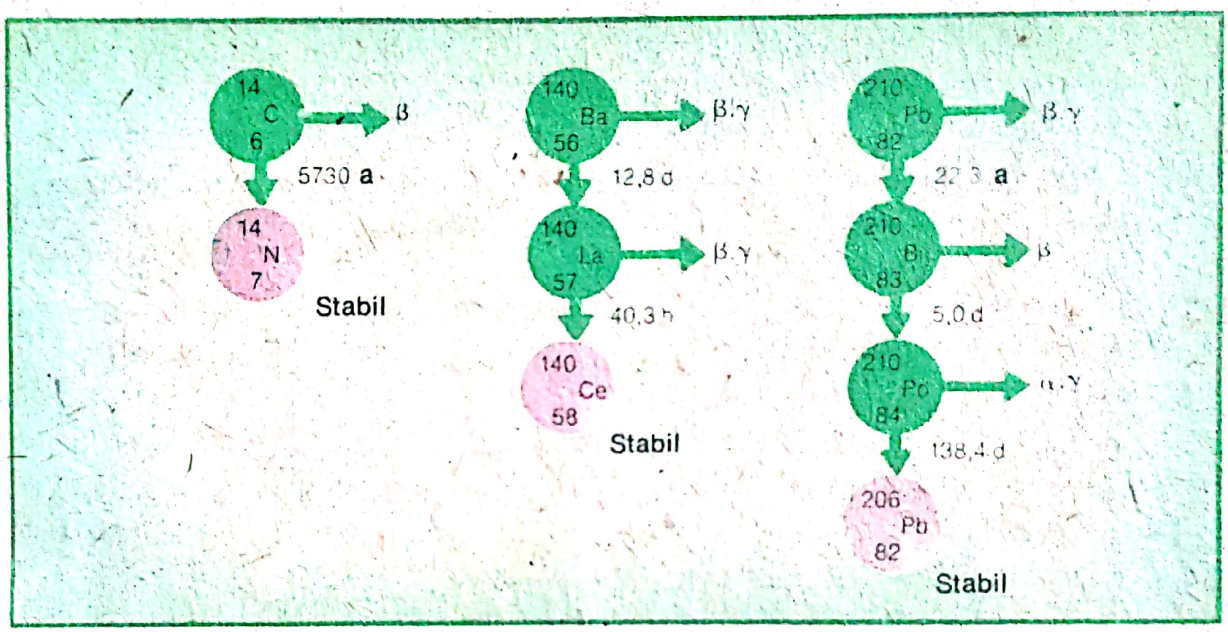


Fig. 2. Dezintegrarea unor radionuclizi, radiațiile emise și timpii de înjumătățire.

Radiațiile emise în mod obișnuit de radionuclizi sînt: *particule alfa*, *particule beta* și *fotoni gamma*. O particulă alfa constă din doi protoni și doi neutroni legați împreună; ea este, astfel, grea și are o sarcină egală cu două sarcini elementare. Radiația gamma reprezintă o cantitate discretă de energie fără masă sau sarcină, care se propagă ca o undă.

În mod obișnuit se exprimă energia cu care sînt emise radiațiile în unitatea numită *electron-volt*, cu simbolul eV: aceasta este echivalentă cu energia cîștigată de un electron care străbate o diferență de potențial de un volt. Multipli ai acestei unități sînt folosiți în mod frecvent, în special un milion (sau 10^6) electron-volți, simbol MeV. De exemplu, energia unei particule alfa emise de poloniul-210 este de circa 5,3 MeV. Particulele beta emise de bariul-140 și lantanul-140 au energiile maxime într-un domeniu cuprins între 0,5 și 3,8 MeV, iar energiile fotonilor gamma între 0,01 și 3,3 MeV.

Scanned with OKEN Scanner

În natură există cîteva elemente *radioactive*, cele mai bine cunoscute fiind uraniul şi toriul. Alte cîteva elemente au izotopi radioactivi care se găsesc în natură, cei mai stabili fiind carbonul-14 şi potasiul-40. În ultimele cîteva zeci de ani s-au produs cu mijloace artificiale cîteva sute de izotopi radioactivi ai elementelor naturale, inclusiv cei bine cunoscuţi ca stronţiu-90, cesiu-137 şi iod-131. S-au produs, de asemenea, şi cîteva elemente radioactive, de exemplu, prometiu şi plutoniu, dar cel din urmă apare sub formă de urme şi în minereurile de uraniu.

Activitatea unei cantităţi de radionuclid este dată de rata cu care se produc dezintegrări spontane. Activitatea se exprimă printr-o unitate numită *becquerel* (simbol Bq), după numele savantului francez care a descoperit radioactivitatea în anul 1896. Un becquerel este egal cu 1 dezintegrare (a unui radionuclid) într-o secundă. În mod frecvent sînt utilizaţi multiplii becquerelului, cum ar fi megabecquerelul (MBq) egal cu un milion de becquereli. De exemplu, un gram de plutoniu-239 are o activitate de aproximativ 2000 MBq: el emite circa 2000 milioane de particule alfa în fiecare secundă.

În trecut activitatea se exprima cu unitatea numită curie*.

Timpul necesar ca activitatea unui radionuclid să scadă la jumătate, prin dezintegrare, se numeşte *timp de înjumătăţire*, simbol $T_{1/2}$. Fiecare radionuclid are un timp de înjumătăţire unic şi nealterabil: pentru carbon-14 el este de 5730 de ani; pentru bariu-140 de 12,8 zile; pentru lantan-140 de 40,3 ore; pentru plutoniu-239 de 24 131 ani; pentru uraniu-238 de $4{,}47 \cdot 10^9$ ani. Valorile timpilor de înjumătăţire ai diferiţilor radionuclizi variază între fracţiuni de secundă şi milioane de ani. În timpi succesiv egali cu timpul de înjumătăţire, activitatea unui radionuclid se reduce prin dezintegrare la 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 ş.a.m.d. din valoarea iniţială, astfel că este posibil să prevedem activitatea care va fi rămas la orice moment de timp ulterior. Pe măsură ce cantitatea de radionuclid descreşte, radiaţia emisă descreşte în mod proporţional. Un nuclid stabil se poate considera a fi un radionuclid cu un timp de înjumătăţire infinit.

Există multe alte tipuri de radiaţii ionizante, dar două merită atenţie specială: *radiaţiile X* şi neutronii. Radiaţiile X sînt produse, în mod obişnuit, prin bombardarea cu electroni a unei ţinte metalice într-un tub vidat. Ele au proprietăţi similare cu cele ale radiaţiilor gamma, dar de obicei au energie mai mică: o instalaţie obişnuită de radiaţii X dintr-un spital emite radiaţii X cu energii pînă la 0,15 MeV. Neutronii pot fi eliberaţi de diferiţi nuclizi în mai multe moduri. Dacă, de exemplu, se bombardează beriliu-9 cu particule alfa de 5,3 MeV, emise de poloniul-210, se formează un nuclid de carbon-12 şi se emit neutroni cu energia medie de 4,2 MeV. Totuşi, cea mai puternică sursă de neutroni este *reactorul nuclear*, care va fi descris în capitolul 7.

---

* Relaţia dintre anumite unităţi de radiaţie vechi şi noi este dată în Anexa II.

Scanned with OKEN Scanner

VITEZA RADIAȚIILOR

Radiațiile gamma și X sînt de aceeași natură ca și lumina vizibilă; astfel, ele se deplasează tot timpul cu viteza luminii, de $3 \cdot 10^8$ metri pe secundă. Deși viteza inițială a unei particule depinde de energia și de masa particulei, nu poate depăși viteza luminii.

De un interes particular, în legătură cu anumiți reactori nucleari, sînt *neutronii termici*. Aceștia sînt neutroni ce au fost încetiniți într-atît încît au aceeași energie termică medie ca și aceea a atomilor sau a moleculelor prin care se mișcă. Energia medie a neutronilor la temperatura obișnuită, a mediului, este de circa 0,025 eV, corespunzînd unei viteze medii de 2200 metri pe secundă ($2{,}2 \cdot 10^3\ m \cdot s^{-1}$).

RADIAȚIA ȘI ȚESUTUL VIU

Cînd radiația pătrunde în substanță, ea pierde energie. Particulele alfa și beta, fiind încărcate, pierd energia prin *interacții electrice* (coulombiene) cu electronii atomilor pe lîngă care trec. Radiațiile gamma și X își transferă energia într-o multitudine de feluri, dar fiecare dintre ele presupune eliberarea unui electron, care, ulterior, pierde energie prin interacții electrice. Și neutronii pierd energie în diferite moduri, cel mai important dintre ele fiind prin ciocnirea cu nucleele de hidrogen, care nu sînt altceva decît protoni; acești protoni ciocniți sînt puși în mișcare și, fiind încărcați, pierd la rîndul lor energie prin interacții electrice.

Într-o astfel de interacție electrică, un electron este expulzat din atomul unei molecule, lăsînd molecula încărcată pozitiv. În mod simbolic este prezentat acest lucru în cazul moleculei de apă, care are 10 protoni: numai 9 electroni rămîn după trecerea particulei încărcate, iar molecula ca întreg are o sarcină pozitivă în exces (fig. 3).

Procesul prin care un atom neutru sau o moleculă devin încărcate se numește *ionizare*, iar entitatea care rezultă este un *ion*. Electronul expulzat poate, la rîndul său, să ionizeze alți atomi sau alte molecule.

Scanned with OKEN Scanner

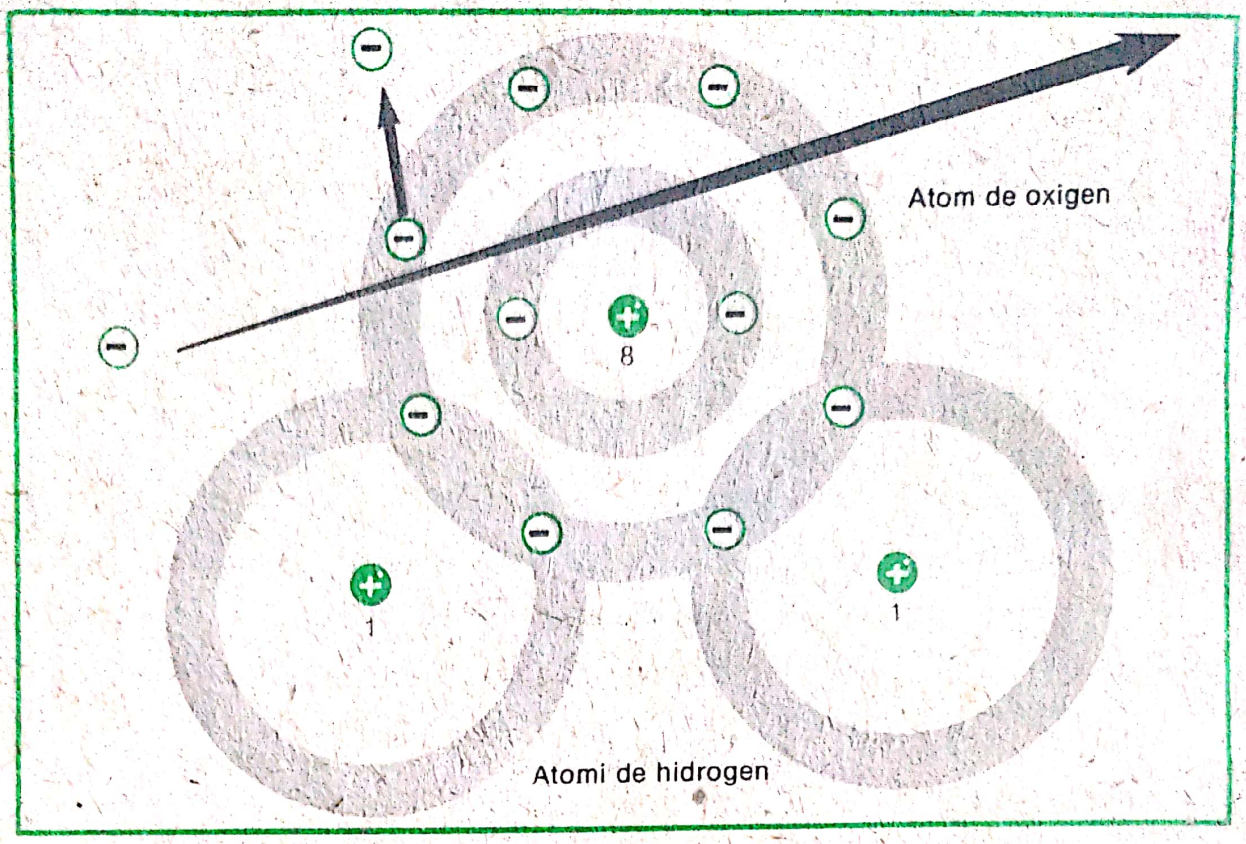


Fig. 3. Ionizarea moleculei de apă de către o particulă încărcată.

La trecerea unei particule încărcate printre atomi ea poate ceda energie electronilor atomilor chiar fără ca aceştia să fie expulzaţi. Acest proces se numeşte *excitare*. Întreaga energie cedată substanţei de către radiaţie este în cele din urmă disipată sub formă de căldură.

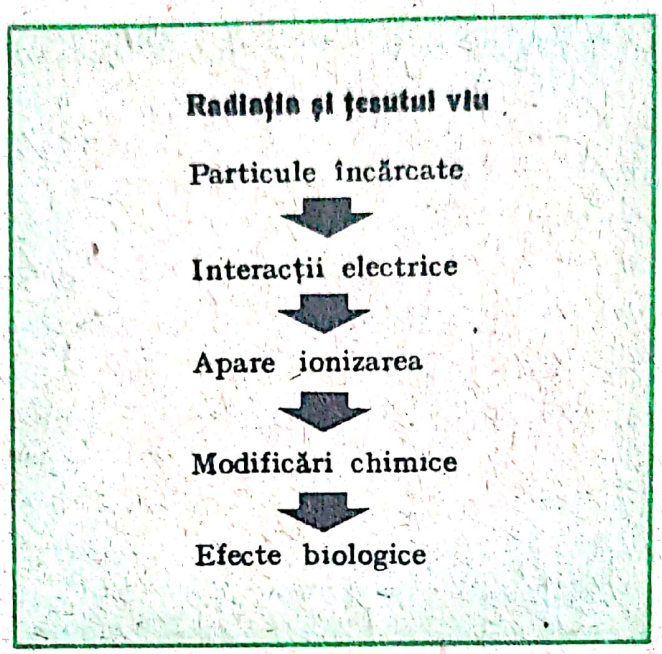
Moleculele de apă încărcate se pot transforma în alte entităţi numite *radicali liberi*, care sînt puternic reactivi din punct de vedere chimic şi pot, de exemplu, să modifice molecule importante ale unui ţesut. Gruparea dintre un atom de oxigen şi unul de hidrogen, OH, reprezintă un astfel de radical.

Unitatea de bază a ţesutului viu este celula. Fiecare celulă are un nucleu care poate fi considerat drept centrul ei de control. *Nucleul unei celule* este deosebit de nucleul unui atom. Apa constituie cam 80% dintr-o celulă, restul de 20% fiind compuşi complecşi.

De o importanţă cu totul particulară este compusul numit acid dezoxiribonucleic, ADN, care se găseşte în special în nucleul celulei. ADN controlează structura şi funcţionarea celulei şi produce replici ale lui însuşi. Aceste molecule sînt mari şi structurile care le poartă, *cromozomii*, pot fi văzute la microscop. Deşi modurile în care radiaţia afectează celulele nu sînt pe deplin înţelese, multe dintre ele presupun modificări ale ADN. Radiaţia poate acţiona în două moduri. O moleculă de ADN se poate ioniza rezultînd o modificare chimică directă, sau molecula poate fi modificată indirect prin intermediul unui radical liber din lichidul celulei. În ambele cazuri modificarea chimică

Scanned with OKEN Scanner

poate sta la baza unui efect biologic dăunător, datorit fie unui defect puternic localizat, fie unui defect global al cromozomului ce se poate vedea la microscop. Ambele feluri de defecte au fost implicate în tarele genetice și în dezvoltarea cancerului.



Efectele radiației sînt discutate mai departe în capitolul 5.

Una dintre proprietățile cele mai importante ale diferitelor radiații ionizante este reprezentată de adîncimea de pătrundere în țesut. Particulele alfa abia pot pătrunde prin suprafața exterioară a pielii: în consecință, radionuclizii care le emit nu sînt periculoși, în afara cazului în care ar fi încorporați în organism. Aceasta se poate întîmpla prin inhalare sau prin ingestie ori printr-o rană deschisă care se contaminează. Particulele beta pot pătrunde în organism circa 1 cm și deci radionuclizii care le produc sînt periculoși pentru țesuturile superficiale, dar nu și pentru organele interne, cu excepția cazului cînd sînt încorporate în ele. Radiațiile gamma, însă, trec prin întregul organism și, prin urmare, radionuclizii care le emit pot fi periculoși, fie în afara, fie înăuntrul corpului. La fel, radiațiile X și neutronii pot trece prin corp.

MĂRIMI DOZIMETRICE

Radiațiile ionizante nu pot fi percepute direct de către simțurile omului, dar pot fi detectate și măsurate cu o varietate întreagă de mijloace, printre care *filme fotografice*, *substanțe termoluminiscente*, *contori Geiger* și *detectoare*

Scanned with OKEN Scanner

cu scintilații. Măsurările făcute cu astfel de detectoare se pot interpreta în termenii dozei de radiație absorbită de organism sau de o anumită parte a corpului. Cînd nu sînt posibile măsurări, ca, de exemplu, atunci cînd un radionuclid este depozitat într-un organ intern, este posibil să calculăm doza absorbită de acel organ dacă este cunoscută activitatea radionuclidului din el.

Doza absorbită se exprimă într-o unitate numită *gray* (simbol Gy), după numele unui savant britanic. Ea reprezintă energia cedată de radiația ionizantă unității de masă a substanței prin care trece (cum ar fi țesutul). Un gray corespunde unui joule pe kilogram. În mod frecvent se folosesc submultipli ai grayului, cum ar fi micrograyul (μGy), care este a milioana parte dintr-un gray.

În trecut, doza absorbită se exprima printr-o unitate numită rad (vezi Anexa II).

Doze absorbite egale nu au neapărat efecte biologice egale: un gray de radiație alfa într-un țesut, de exemplu, este mai periculos decît un gray de radiație beta, deoarece particula alfa fiind mai lentă și cu sarcină electrică mai mare decît particula beta disipează mai multă energie de-a lungul traiectoriei sale. Pentru a pune toate radiațiile ionizante pe o bază egală în raport cu posibilitatea de a produce efecte negative este nevoie de o altă mărime fizică. Această mărime este *echivalentul dozei* și se exprimă printr-o unitate numită *sievert*, după numele unui savant suedez și simbolul ei este Sv. Echivalentul dozei este egal cu doza absorbită înmulțită cu un factor care ține cont de modul în care o radiație anumită își distribuie energia în țesut, influențînd astfel eficacitatea de a produce efecte reale. În cazul radiațiilor gamma, al radiațiilor X și al particulelor beta factorul a fost luat egal cu unitatea; astfel grayul și sievertul sînt numeric egale. În cazul particulelor alfa, factorul este 20, astfel încît 1 Gy de radiație alfa corespunde la un echivalent al dozei de 20 Sv. În mod obișnuit se folosesc submultipli ai sievertului, cum ar fi milisievertul (mSv), care reprezintă a mia parte dintr-un sievert.

În trecut, doza echivalentă se exprima în unitatea numită rem (vezi Anexa II).

Echivalentul dozei constituie, astfel, un indicator al riscului la expunere a unui anumit țesut, la diferite radiații: un sievert de radiație alfa primită de plămîn, de exemplu, se consideră că ar produce același risc de cancer fatal la plămîni ca și un sievert de radiație beta. Totuși, riscul unei tumori fatale per sievert nu este același pentru diferite țesuturi ale organismului: de exemplu, acest risc este mai mic pentru tiroidă decît pentru plămîni. Mai există și un alt tip important de efect negativ: riscul unei perturbări ereditare serioase, care ar apare prin iradierea testiculelor sau a ovarelor și care este diferit ca formă de manifestare și intensitate și trebuie luat, de asemenea, în considerație.

Scanned with OKEN Scanner

Aceasta se poate face considerînd echivalentul dozei pentru fiecare organ sau țesut important al corpului și înmulțindu-l cu un factor de pondere legat de riscul asociat cu acel organ. Suma ponderată a acestor echivalenți ai dozei se numește *echivalent al dozei efectiv*. Această mărime permite ca o varietate de distribuții neuniforme ale echivalentului dozei în corp să fie exprimată ca un singur număr, reprezentînd în mare riscul pentru sănătate al oricărora dintre distribuțiile diferite ale echivalentului dozei. Procedeele necesare sînt prezentate în casetele din aceaste pagini, dar de ele au nevoie numai specialiștii în dozimetria radiațiilor. Celorlalți cititori le este suficient să știe că echivalentul dozei efectiv este un indicator general al riscului pentru sănătate în cazul oricărei expuneri la radiație.

Adesea este util să avem o măsură a dozei totale de radiație primită de un grup de oameni sau de întreaga populație. Mărimea folosită pentru exprimarea acestui total este *echivalentul dozei efectiv colectiv*. El se obține prin înmulțirea echivalentului dozei efectiv mediu, caracteristic grupului considerat, cu numărul de persoane din acel grup.

De exemplu, în capitolul următor se va vedea că echivalentul dozei efectiv primit anual de locuitorii Marii Britanii de la radiația de origine naturală este, în medie, de 1870 μSv. Deoarece populația Marii Britanii este în jur de 56 de milioane, echivalentul dozei efectiv colectiv pentru întreaga comunitate britanică este produsul acestor două numere, aproximativ 100 000 *sievert-om* (simbol Sv-om).

Adesea echivalentul dozei efectiv este denumit pe scurt doză, iar echivalentul dozei efectiv colectiv — *doză colectivă*. Vom folosi acest limbaj în capitolele următoare, cu excepția cazurilor cînd exactitatea exprimării este esențială.

Ponderile factorilor de risc

Țesutul sau organul	*Factor*
Testicule și ovare	0,25
Sîni	0,15
Măduva osoasă	0,12
Plămîni	0,12
Tiroida	0,03
Suprafața oaselor	0,03
Restul	0,30
Totalul pentru tot corpul	1,00

Scanned with OKEN Scanner

Ierarhizarea mărimilor dozimetrice

Doza absorbită

energia cedată prin radiație unității de masă a țesutului

Echivalentul dozei

doza absorbită ponderată în funcție de periculozitatea fiecărei radiații

Echivalentul dozei efectiv

echivalentul dozei ponderat în funcție de susceptibilitatea la îmbolnăvire a diferitelor țesuturi

Echivalentul dozei efectiv colectiv

echivalentul dozei efectiv al unui grup în raport cu o sursă de radiație

Calculul echivalentului dozei

Să considerăm situația în care un radionuclid produce iradierea plămînului, a ficatului și a suprafețelor osoase. Să presupunem că echivalentele dozei pentru fiecare țesut sînt, respectiv, 100, 70 și 300 mSv. Doza efectivă se calculează astfel:

$$100 \times 0{,}12 + 70 \times 0{,}06 + 300 \times 0{,}03 = 25{,}2 \text{ mSv}.$$

Calculul indică faptul că riscul unui cancer fatal asociat cu această distribuție a iradierii corespunde riscului unei boli fatale și a unui defect ereditar dat de un echivalent al dozei de 25,2 mSv primită în mod uniform de întregul organism.

Scanned with OKEN Scanner

3 RADIAȚIA DE ORIGINE NATURALĂ

Cum s-a menționat în capitolul 1, radiația de origine naturală este prezentă în întreg mediul înconjurător. Radiația poate ajunge la Pămînt din spațiul cosmic, Pămîntul însuși este radioactiv, iar radioactivitatea naturală este prezentă în alimente și în aer. Fiecare dintre noi este expus la radiația naturală într-o măsură mai mare sau mai mică, iar cele mai multe persoane de la aceasta primesc cea mai mare parte a dozei.

RADIAȚIA COSMICĂ

Originea *radiației cosmice* este un subiect în discuție. Unii specialiști sînt de părere că ar veni, în special, din galaxia noastră, alții că ar veni din afara ei. Și Soarele contribuie întrucîtva. Radiațiile de origine nedeterminată sînt practic constante ca număr, dar cele care vin de la Soare sînt emise în timpul erupțiilor solare. Numărul particulelor cosmice care intră în atmosfera Pămîntului este afectat și de cîmpul magnetic al acestuia: mai multe intră pe la poli decît pe la ecuator. Cînd pătrunând în atmosferă, particulele din radiația cosmică suferă interacții complexe și sînt absorbite de ea în mod gradat, astfel că doza descrește pe măsură ce scade altitudinea. În Marea Britanie doza anuală datorită radiației ce vine din spațiul cosmic este în medie de aproximativ 300 μSv.

Deoarece cele mai multe persoane trăiesc la altitudini joase, din acest punct de vedere există o variație mică a dozei anuale, dar există o variație de la 280 μSv pe an în sudul Angliei pînă la 310 μSv pe an în nordul Scoției, din cauza creșterii în latitudine. Nu se prea poate face mare lucru pentru a micșora expunerea la radiația cosmică, deoarece ea pătrunde ușor prin clădirile obișnuite.

Scanned with OKEN Scanner

RADIAȚII GAMMA TERESTRE

Toate materialele din scoarța Pămîntului sînt radioactive. Se crede, într-adevăr, că energia rezultată din radioactivitatea naturală din adîncul Pămîntului contribuie la mișcările scoarței. Uraniul, toriul și potasiul-40 contribuie la această energie.

Uraniul este dispersat în sol și în roci în concentrații mici. Acolo unde atinge 1500 părți per milion într-un anumit zăcămînt ar putea fi economic de exploatat și folosit în reactorii nucleari. Uraniul-238 este capul unei lungi serii de radionuclizi ai diferitelor elemente, care se transformă succesiv pînă ajung la nuclidul stabil plumb-206; ultimele trei transformări sînt prezentate în diagrama din capitolul 2. Printre produsele timpurii de dezintegrare există un izotop al unui gaz radioactiv numit radon-222, din care o parte difuzează în atmosferă, unde continuă să se dezintegreze. Toriul este și el dispersat pe pămînt, iar toriul-232 este capul unei alte serii radioactive, care dă naștere altui gaz radioactiv, radon-220, numit toron. Potasiul-40 reprezintă 120 de părți la un milion de părți de element stabil, care, la rîndul său, constituie în jur de 2,4% în greutate din scoarța Pămîntului.

Radiațiile gamma emise de radionuclizii tereștri iradiază întregul corp uman mai mult sau mai puțin uniform. Deoarece materialele de construcție sînt extrase din pămînt, sînt și ele radioactive, iar populația este iradiată atît în casă, cît și în aer liber. Dozele sînt afectate de geologia ținutului și de structura clădirilor, dar în Marea Britanie doza medie provenind de la radiațiile gamma terestre este în jur de 400 μSv pe an. Există variații considerabile în jurul acestei valori, iar unele persoane primesc doze de cîteva ori mai mari decît media.

Cum nu se alege o zonă de locuit pe baza fondului de radiații gamma și nu se selectează materialele obișnuite de construcție pe baza conținutului radioactiv, nu se poate face prea mult pentru a micșora această doză. Totuși, anumite amplasamente și materiale cu un nivel ridicat de radioactivitate ar putea fi evitate.

PRODUSELE DE DEZINTEGRARE ALE RADONULUI

Cînd gazele radon sau toron ies din pămînt în atmosferă, ele se dispersează în aer și concentrațiile sînt mici. Totuși, cînd pătrund într-o locuință, fie prin pereți, fie prin podea, concentrațiile cresc din cauza lipsei unei alimentări

Scanned with OKEN Scanner

cu aer proaspăt din exterior. Produsele imediate de dezintegrare ale radonului-222 și radonului-220 sînt radionuclizi cu timpi de înjumătățire scurți, care se atașează particulelor de praf din aer. Cînd acestea din urmă sînt inhalate, iradiază plămînul.

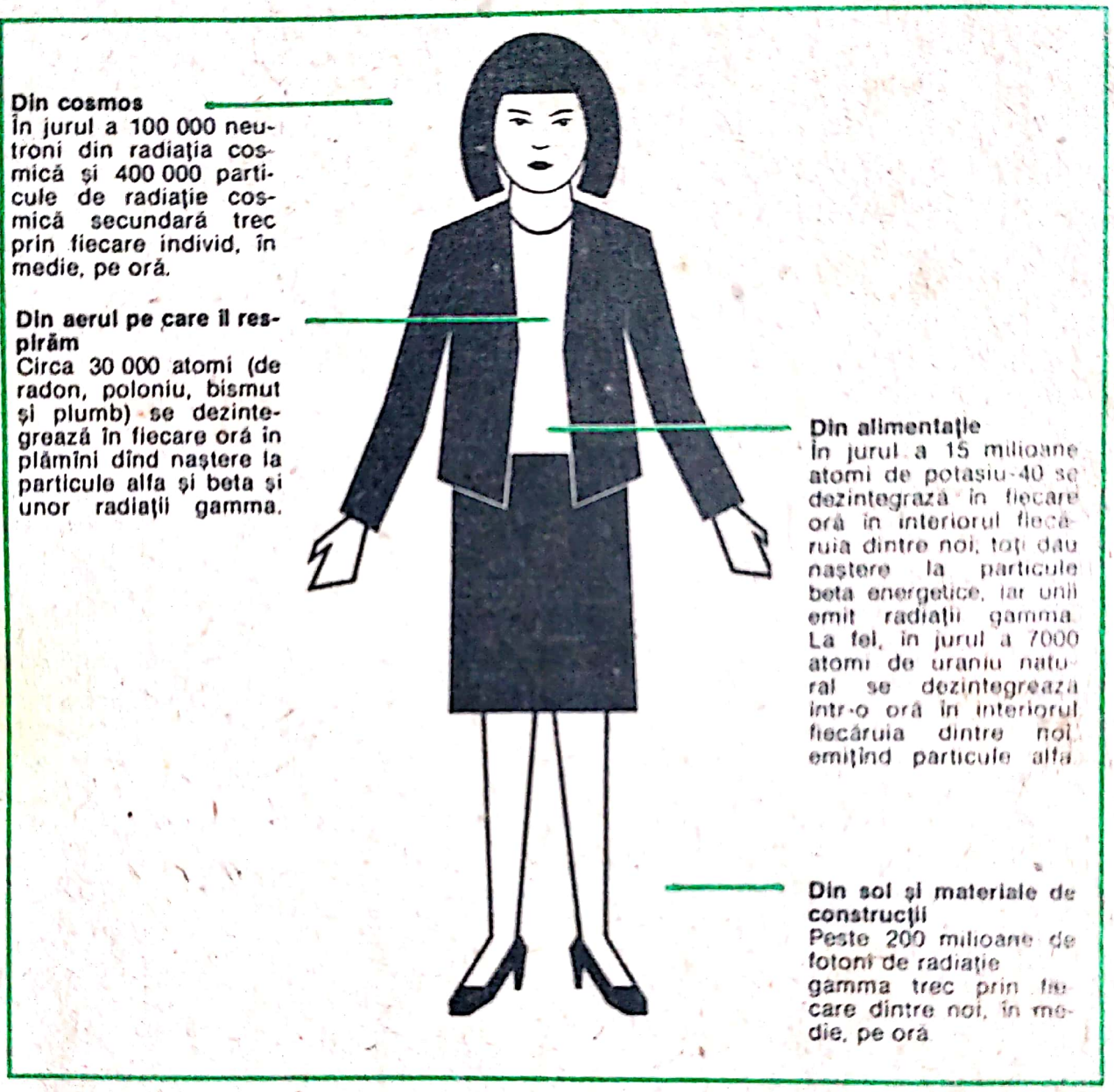


Fig. 4. Principala sursă a dozei umane de radiație.
Aici sînt date exemple privind expunerea la radiația naturală. Informațiile nu sînt complete și sînt date numai pentru a indica ordinul de mărime al expunerii la radiația naturală. Acesta este un alt mod de a privi numărul real de evenimente radioactive naturale ce provoacă iradierea corpului. Legătura cu dozele este mai complicată.

Se estimează că, în Marea Britanie, doza anuală datorită produselor radonului este de 800 μSv, în medie. Există variații pronunțate în jurul acestei

Scanned with OKEN Scanner

valori medii și s-au descoperit locuințe particulare în care doza primită de ocupanți era mai mare cu două *ordine de mărime*.

Se poate modifica doza primită în interiorul încăperilor din partea produselor de dezintegrare ale radonului fie prin îndepărtarea produselor de dezintegrare din clădire, fie prin împiedicarea radonului de a pătrunde în ea. Produsele de dezintegrare pot fi îndepărtate prin creșterea ventilației sau prin folosirea instalațiilor de purificare a aerului, cum ar fi precipitatorii electrostatici. Calea cea mai bună este de a reduce pătrunderea radonului din sol, prin etanșarea podelei sau prin crearea și îmbunătățirea ventilației din subsoluri. Asemenea tehnici sînt studiate în diferite țări, inclusiv în Marea Britanie.

RADIOACTIVITATEA ALIMENTELOR

În aer, alimente și apă sînt prezenți și alți radionuclizi din seriile uraniului și toriului, în particular plumb-210 și poloniu-210; aceștia iradiază țesuturile interne ale corpului. Potasiul-40 este introdus în corp o dată cu alimentele și reprezintă sursa majoră de iradiere internă, cu excepția produselor de dezintegrare ale radonului. Un număr de radionuclizi, cum ar fi carbonul-14, sînt creați în atmosferă de radiațiile cosmice, iar aceștia contribuie și ei la iradierea internă. Se estimează că doza dată de aceste surse de iradiere internă este de 370 μSv pe an, în Marea Britanie, din care potasiul-40 contribuie cu 170 μSv. Nu există informații despre variațiile individuale, dar conținutul de potasiu-40 al corpului se poate controla biologic și variază cu cantitatea de grăsime.

Echivalentele dozei efective anuale medii date de radiația de origine naturală, în Marea Britanie

Sursa	*μSv*
Radiația cosmică	300
Radiații gammă terestre	400
Produse de dezintegrare ale radonului	800
Altă radiație internă	370
Total	1870

Există mici posibilități de modificare a expunerii interne date de acești radionuclizi inhalați și ingerați, cu excepția evitării oricăror alimente sau a apei cu un ridicat conținut de radioactivitate.

Scanned with OKEN Scanner

DOZE TOTALE

Echivalentul dozei efectiv total (sau doza totală) datorit radiației de origine naturală este, în medie, în Marea Britanie, în jurul a 1870 μSv pe an. Diferențele în dozele medii de la o localitate la alta pot depăși 5000 μSv pe an și diferențele în dozele individuale pot ajunge pînă la 100 000 μSv pe an, datorită existenței unor clădiri care dau doze ridicate în special din partea radonului și a produselor lui de dezintegrare. Echivalentul dozei efectiv colectiv este în jur de 100 000 Sv-om pe an. Deoarece doza colectivă variază cu mărimea populației, chiar dacă nu există o modificare a nivelelor de radiație, este convenabil să se indice media dozelor pe întreaga populație. Aceste mărimi sînt bune pentru comparații, dar este necesar să fie suplimentate cu date adiționale acolo unde există largi variații față de medie.

Scanned with OKEN Scanner

4 RADIAȚIA DE ORIGINE ARTIFICIALĂ

TRATAMENTE MEDICALE

Instalațiile de radiații X (Röntgen) folosite în spitale și în clinici sînt, probabil, cele mai cunoscute surse de radiație artificială. Ele sînt folosite într-o largă varietate de procedee de diagnostic, de la simple radiografii ale toracelui la studii dinamice complicate ale inimii. O radiografie a toracelui va transfera plămînului un echivalent al dozei de 20 μSv. Pacienților li se pot administra și radionuclizi cu scopuri de investigație, unul dintre cei mai mult folosiți fiind tehnețiul-99 m, care are un timp de înjumătățire scurt și se folosește la o gamă largă de examinări, cum ar fi tomografii ale creierului sau ale oaselor.

Radiațiile se mai utilizează și în scopuri terapeutice. Una dintre principalele metode de tratare a cancerului este, în mod paradoxal, aceea de a iradia puternic țesuturile maligne, împiedicînd astfel funcționarea celulelor tumorii. În terapia externă sînt utilizate în mod frecvent radiații X de mare energie sau radiații gamma date de sursele de cobalt-60. Sînt necesare doze absorbite foarte puternice și pot fi prescrise cîteva zeci de gray. Se mai folosesc fascicule de neutroni sau alte radiații ionizante. În scopuri terapeutice radionuclizii se pot administra, așa cum este cazul iodului-131, pentru tratamentul cancerului tiroidian.

Deși folosirea în medicină a radiațiilor oferă pacienților beneficii directe enorme, ea contribuie prin intermediul lor la doza pe care o primește populația ca întreg. Se estimează că echivalentul dozei efectiv mediu datorit procedurilor medicale este de 250 μSv pe an. Diferența față de o estimare anterioară de 500 μSv se datorește în primul rînd unei aprecieri mai bune și nu unei reduceri a expunerii. Pentru o populație de 56 de milioane aceasta reprezintă o doză colectivă în jurul a 14 000 Sv-om. S-ar putea modifica această doză totală reducînd doza la pacienți individuali sau frecvența tratamentelor radiologice, dar cu grijă pentru a nu micșora beneficiile asupra pacienților.

Scanned with OKEN Scanner

Procedurile medicale pot produce, indirect, vătămări la descendenții actualilor pacienți. Astfel, un interes deosebit este centrat pe mărimea numită *doză semnificativă genetic*, în mod special în legătură cu folosirea diagnosticelor cu radiații. Această mărime ar fi doza care, dacă ar fi dată fiecărui membru al populației, ar produce aceleași defecte ereditare ca și dozele primite în mod real de către persoanele individuale. În cazul radiologiei de diagnostic doza semnificativă genetic se determină în funcție de dozele primite de *gonadele* pacienților, precum și de numărul de copii care vor fi procreați ulterior; ea reprezintă astfel un indicator al grijii cu care sînt protejate organele de reproducere în timpul procedurilor medicale, precum și al cantității de radiografii efectuate în țară asupra femeilor gravide și a copiilor.

Valoarea dozei semnificative genetic a fost în Marea Britanie de 120 μSv în anul 1977 în comparație cu 140 μSv în 1957, dar se urmărește pe mai departe reducerea ei. Pentru comparație, doza semnificativă genetic anuală produsă de radiația naturală este de aproximativ 1 000 μSv. În conceptul de echivalent al dozei efectiv a fost luat în considerație riscul defectelor ereditare.

Doze anuale în Marea Britanie primite prin proceduri medicale

Doza medie	250 μSv
Doza colectivă	14 000 Sv-om
Doza semnificativă genetic	120 μSv

DEPUNERI RADIOACTIVE DE LA EXPERIENȚELE CU ARME NUCLEARE

Radioactivitatea artificială este răspîndită în toată lumea ca rezultat al experiențelor în atmosferă cu arme nucleare. De exemplu, pe pămînt s-au depus aproape 3 tone de plutoniu-239. În urma experiențelor apare o mare varietate de radionuclizi; de aceea, de interes principal din punct de vedere al dozei sînt carbonul-14, stronțiul-90 și cesiul-137.

O bună parte din radioactivitate este inițial injectată în păturile superioare ale atmosferei, de unde este transferată încet în păturile inferioare și de aici mult mai rapid spre pămînt.

Atît procesul, cît și materialul se numesc depunere radioactivă. De la tratatul din anul 1963 de interzicere a experiențelor nucleare în atmosferă, activitatea radioactivă din atmosfera superioară a descrescut notabil, deși scăderea este oprită din cînd în cînd de experiențele efectuate de țările nesemnatare ale tratatului.

Scanned with OKEN Scanner

Radionuclizii care intervin în depunerile radioactive sînt inhalaţi direct sau incluşi în hrană şi ambele procese au ca efect o expunere internă a corpului. Radionuclizii care emit radiaţii gamma, atunci cînd sînt depozitaţi pe sol produc iradierea externă. În Marea Britanie echivalentul dozei efectiv este în prezent de circa 10 μSv pe an, scăzînd de la un maxim de 80 μSv la începutul anilor '60; dacă experienţele nu vor fi reluate pe scară mare, se aşteaptă încă o reducere a dozei. Doza anuală colectivă corespunzătoare este de 580 Sv-om. Nu se poate face nimic în legătură cu dozele primite de oameni, din cauza experienţelor care au avut deja loc.

Doze anuale în Marea Britanie primite de la depunerile radioactive

Doza medie	10 μSv
Doza colectivă	580 Sv-om

DEVERSĂRI ÎN MEDIU

Industria energetică nucleară deversează substanţe radioactive în mediul înconjurător; în cantităţi mai mici un aport îl au şi unităţile de cercetare şi spitalele. În capitolele 7 şi 8 se vor discuta anumite aspecte ale energeticii nucleare, dar este potrivit să discutăm aici dozele care apar din deversările de rutină.

Uraniul necesar reactorilor nucleari din Marea Britanie se importă. Aici el este preparat mai întîi sub formă de combustibil, pe urmă folosit în reactori şi apoi este reprocesat. În fiecare din cele trei stadii se deversează în mod controlat radioactivitate în aer şi în apele de suprafaţă. Deversările sînt supuse unor restricţii legale. Doza primită de populaţie depinde de natura şi de activitatea radionúclizilor eliberaţi, precum şi de modul în care sînt dispersaţi în mediu şi de reşedinţa, modul de viaţă şi obiceiurile alimentare ale persoanelor în cauză. Informaţiile pe care le prezentăm aici se referă la condiţiile de la începutul anilor '80. Deoarece condiţiile se schimbă de la an la an, totuşi, valorile au fost rotunjite pentru a evita sugerarea unei precizii nejustificate.

Deversările radioactive în aer în timpul preparării combustibilului dau naştere la o doză colectivă de 0,1 Sv-om pe an pentru populaţia Marii Britanii, iar doza anuală pentru persoanele care trăiesc lîngă uzinele de preparare se consideră a fi mai mică decît 5 μSv. Deversările în apă au şi ele ca rezultat

Scanned with OKEN Scanner

o doză colectivă anuală de circa 0,1 Sv-om și o doză maximă pentru persoanele din zona respectivă ce nu depășește 50 μSv pe an.

Contribuția la doze a deversărilor în mediu din partea industriei energetice nucleare la începutul anilor '80

Stadiul	*în*	*maximă* μSv pe an	*colectivă* Sv-om pe an
Prepararea combustibilului	aer	5	0,1
	apă	50	0,1
Funcționarea reactorului	aer	100	4
	apă	350	0,1
Reprocesarea combustibilului	aer	200	2
	apă	840	70

Gazele radioactive și aerosolii deversați în aer de reactori dau populației Marii Britanii o doză colectivă de 4 Sv-om pe an, iar doza anuală pentru persoanele din zonă cele mai expuse este apreciată la mai puțin de 100 μSv pe an. Deversările de apă din bazinele speciale în care este ținut, pe amplasamentele reactorilor, combustibilul folosit produc o doză maximă de pînă la 350 μSv pe an pentru localnici și o doză colectivă în Marea Britanie de circa 0,1 Sv-om prin consumarea peștelui care conține radionuclizii cesiului.

Se apreciază că doza colectivă pe care o primește populația Marii Britanii datorită deversărilor în aer în timpul reprocesării combustibilului este în jurul a 2 Sv-om pe an, iar doza anuală maximă individuală nu depășește 200 μSv. Deversările de deșeuri radioactive lichide adaugă la doza colectivă 70 Sv-om pe an și o doză anuală pentru localnicii cei mai expuși mai mică de 840 μSv, din nou prin consumarea peștelui care conține radionuclizi (rezultate din anul 1984),

Astfel, doza colectivă primită de populația Marii Britanii de la toate reziduurile deversate controlat de industria energetică nucleară este de 80 Sv-om pe an, ceea ce ar implica o doză medie de 1,5 μSv pe an pentru fiecare individ dacă doza ar fi uniform distribuită pe întreaga populație. O valoare reprezentativă pentru doza primită de persoanele cele mai mult expuse din țară este în jurul a 1 mSv.

Aceste deversări sînt controlate și se reduc în continuare. Totuși, reducerea lor ar necesita cheltuieli în plus și reprezintă una dintre îndatoririle factorilor de decizie să stabilească dacă se impun reduceri mai mari. Motivațiile unor astfel de decizii sînt discutate în capitolul 6.

Mai există deversări controlate de natură minoră, în aer și în apele de suprafață, provocate de diferite instituții de cercetare, de apărare, industriale și medicale. Chiar dacă dozele colective sau individuale provocate de ele sînt

Scanned with OKEN Scanner

neglijabile, ele sînt supuse acelorași constrîngeri legale ca și deversările provenite din programul energetic nuclear.

Anumite deșeuri cu activitate mică provenind de la toate instituțiile sînt îngropate în amplasamente anume alese. În trecut erau înecate în mare. Dozele individuale și colective care ar apărea de aici sînt neglijabile.

Dozele anuale în Marea Britanie provenind din deversarea radioactivității artificiale

Doza medie	1,5 μSv
Doza colectivă	80 Sv-om
Valoarea reprezentativă pentru persoanele cele mai expuse	1 000 μSv

EXPUNEREA PROFESIONALĂ

Radiația de origine artificială este larg folosită în întreaga industrie, în primul rînd pentru controlul proceselor și al calității produselor, în scopuri diagnostice în stomatologie și în medicina veterinară și, în sfîrșit, ca mijloc important de studiu în colegii, universități și altele. În consecință, există un număr considerabil de mare de persoane expuse la radiație ionizantă în procesul muncii lor, în plus față de cele din medicină sau din industria energetică nucleară. Numărul total de persoane din Marea Britanie catalogate ca lucrînd cu radiații este de aproximativ 135 000.

Echivalentul dozei efectiv pe care îl poate primi o persoană care lucrează cu radiații este limitat prin lege: practic, nu poate depăși 50 mSv pe an. Puține persoane primesc doze apropiate de această limită, iar majoritatea primește o mică fracțiune din ea. De exemplu, doza medie a personalului medical este de circa 0,7 mSv pe an, a personalului din industria nucleară este de 2,5 mSv pe an, iar a radiologilor din industrie de circa 1,7 mSv pe an. Tendința generală a acestor doze medii a fost de descreștere. Media generală a dozei primite de personalul din mediu radioactiv este de circa 1,4 mSv pe an.

În afară de acest personal din industria nucleară, mai există 200 000 de persoane, în special mineri și personal navigant aerian, care sînt expuse la nivele ridicate de radiație naturală. Cei mai expuși dintre aceștia sînt minerii din minele necarbonifere, care primesc în medie anual doze de circa 26 mSv.

Doza colectivă provenind din toată expunerea profesională la radiații ionizante este de circa 450 Sv-om pe an, la care industria nucleară contribuie cu 20%, iar doza anuală mediată pe întreaga populație a Marii Britanii este de circa 8 μSv.

Scanned with OKEN Scanner

Dozele anuale în Marea Britanie provenind din expunerea profesională

Doza medie:	
pentru personalul care lucrează cu radiații	1,4 mSv
pentru întreaga populație	8 μSv
Doza colectivă	450 Sv-om

ALTE SURSE DE RADIAȚII

Multe persoane sînt expuse la radiația ionizantă provenind de la o serie de surse artificiale sau de la surse naturale în condiții artificiale. Între aceste surse se includ ceasurile luminate cu substanțe radioactive, receptoarele de televiziune și călătoriile cu avionul care constituie un apanaj al vieții moderne. În această categorie se include de asemenea expunerea populației la radioactivitatea naturală dispersată în mediu de cenușa evacuată în atmosferă în timpul arderii cărbunelui. Se apreciază că această radioactivitate dă naștere unei doze medii anuale de circa 4 μSv și unei doze colective de circa 240 Sv-om. Dozele primite de purtătorii de ceasuri sînt în scădere, pe măsură ce se folosesc radionuclizi mai puțin periculoși, iar dozele datorite televizoarelor sînt reduse deoarece tuburile sînt bine ecranate; surplusul de doză pe care o primesc, însă, persoanele aflate în avion din partea radiațiilor cosmice va crește proporțional cu creșterea numărului de călătorii. Un control al dozelor este posibil, cel puțin pentru cele provocate de unele dintre aceste surse.

Doza medie primită de populație din partea acestor surse este de circa 11 μSv pe an, astfel încît doza colectivă primită de întreaga populație este de 600 Sv-om.

Doze anuale în Marea Britanie provenind de la alte surse de radiații

Echivalentul dozei efectiv mediu	11 μSv
Echivalentul dozei efectiv colectiv	600 Sv-om

Scanned with OKEN Scanner

DOZE TOTALE

În Marea Britanie doza totală dată de radiația de origine artificială este, în medie, de 280 μSv pe an. Procedurile medicale constituie de departe cele mai importante surse de expunere a populației.

În comparație cu estimările anterioare*, cifra ce reprezintă procedurile medicale s-a redus la jumătate, în primul rînd datorită unei estimări mai bune. Și cifra pentru deversările în mediu s-a redus la jumătate, în special datorită unor deversări reduse. Celelalte cifre nu s-au modificat în mod semnificativ.

Doze anuale medii în Marea Britanie din partea radiațiilor de origine artificială

Sursa	μSv
Proceduri medicale	250
Căderi radioactive	10
Deversări în mediu	1,5
Expunere profesională	8
Alte surse	11
Total	280

ACCIDENTUL DE LA CERNOBÎL

Estimările actuale arată că acesta a adăugat circa 40 μSv pentru perioada de un an (din mai 1986 pînă în aprilie 1987) și un total de aproximativ 20 μSv pentru anii următori.

Ce reprezintă un microsievert?

1 microsievert (1 μSv) este aproximativ:

1/10 din doza primită într-un zbor cu avionul cu reacție pînă în Spania (din Marea Britanie).

Diferența de doză primită din radiația cosmică prin mutarea de la etajul întîi la altul cu 20 m mai sus (aproximativ etajul al șaptelea).

1/20 din doza medie la o singură radiografie pulmonară.

1/10 din doza anuală primită în anul 1980 în Marea Britanie din depunerile radioactive.

2/3 din doza medie primită de populația Marii Britanii datorită deversărilor în mediu de la instalațiile nucleare existente.

* Autorii se referă la ediția a doua (din anul 1981) a prezentei lucrări (N.T.).

Scanned with OKEN Scanner

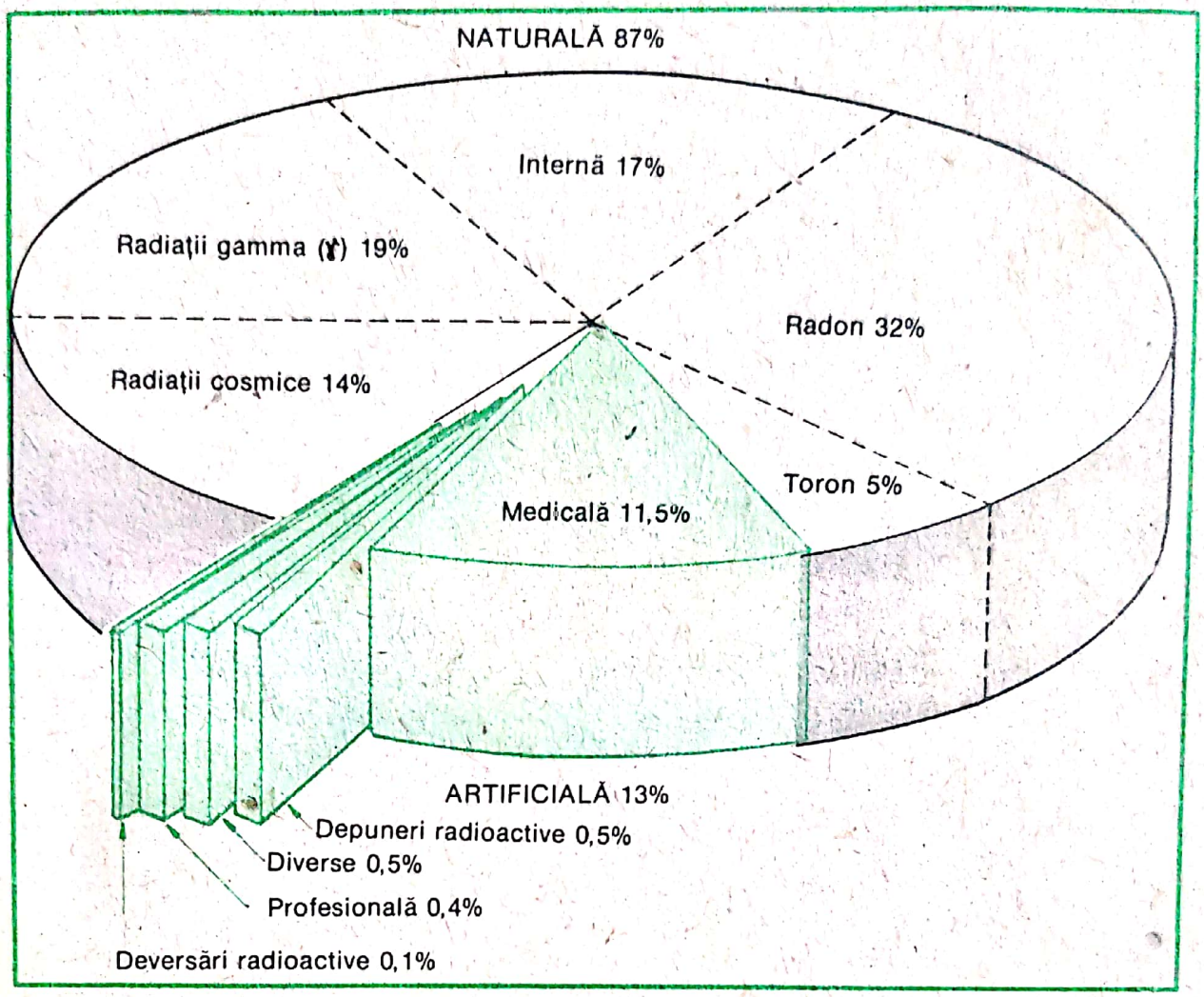


Fig. 5. Expunerea la radiații a populației Marii Britanii. Contribuțiile la echivalentul dozei efectiv mediu.

Datele privind dozele primite de la toate surscle de radiație sînt indicate în capitolele 3 și 4. Echivaletul dozei efectiv total din radiația de origine naturală și artificială este de aproximativ 2150 μSv pe an, în medie, pentru populația Marii Britanii. Aici este prezentată contribuția procentuală a fiecărei surse. Radiația naturală contribuie cu aproape 90% și domină toate celelalte surse. Dozele din radiația naturală variază considerabil, dar nici acest fapt, nici intensitatea radiației naturale nu justifică doze adiționale de la alte surse. Un principiu central al protecției radiologice este ca fiecare sursă să fie analizată separat, fără a o compara cu altele. Totuși, o astfel de diagramă ne ajută să căpătăm un sens al proporțiilor. *Accidentul de la Cernobîl:* doza în Marea Britanie este echivalentă cu puțin peste 2% din doza totală pentru anul mai 1986 — aprilie 1987 și o proporție în marcat declin pentru anii următori.

Ce reprezintă un milisievert?

1 milisievert (1 mSv) este aproximativ:

Doza anuală din deversările industriei nucleare pentru persoanele cele mai expuse.

1/2 din doza anuală datorită radiației naturale în Marea Britanie.

De 100 de ori doza primită într-un zbor cu avionul cu reacție pînă în Spania.

De 50 de ori doza primită în timpul unei singure radiografii X

Scanned with OKEN Scanner

5 EFECTELE RADIAȚIILOR

VĂTĂMĂRI IMEDIATE

Dacă se expune întregul organism la o doză foarte puternică de radiație, decesul poate interveni în cîteva săptămîni: o doză absorbită instantaneu de 5 Gy sau mai mult ar fi, probabil, letală. Dacă doar o mică parte a organismului s-ar expune pentru un timp scurt la o doză foarte puternică, poate să nu survină moartea, dar ar putea apărea alte efecte imediate: o doză absorbită instantaneu de 5 Gy sau mai mult primită numai de piele va produce înroșirea acesteia cam într-o săptămînă, iar o doză similară primită de testicule sau de ovare ar putea provoca sterilitate. Dar dacă aceeași doză totală ar fi primită într-un timp mult mai lung s-ar putea să nu apară imediat semne de vătămare. Totuși, pot apărea defecte și ele se pot manifesta ulterior în cazul persoanei iradiate sau, poate, în cazul urmașilor persoanei.

BOLI MALIGNE

Cel mai grav efect latent al iradierii este cancerul, îndeosebi, cancerul cu consecințe fatale. Procesele fundamentale prin care radiația induce cancer nu sînt înțelese în întregime, dar o *incidență* mărită a diferitelor boli maligne, pe scurt, a cancerului, s-a observat la grupe de oameni care au fost expuse la diferite doze puternice de radiații în anii anteriori. Nu toate persoanele astfel expuse contractează cancer, deoarece cancerul are multe cauze. Totuși, fiecare persoană expusă are o probabilitate în plus de a-l contracta și această probabilitate depinde mult de doza primită. Aici probabilitatea este folosită în sens matematic, nu în sensul comun. Situația este analogă celei din cazul fumatului, cînd toți cei care fumează riscă foarte mult un cancer pulmonar, dar nu înseamnă deloc că absolut toți îl vor și face.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă este cunoscut numărul persoanelor dintr-un grup iradiat și dozele pe care le-au primit și dacă numărul de boli canceroase efectiv observate în cazul grupului este mai mare decît numărul de așteptat în cazul unor grupuri similare neiradiate, atunci numărul în exces de boli canceroase poate fi atribuit radiației și, astfel, se poate calcula riscul apariției cancerului pe unitatea de doză efectivă. Acesta se numește *factor de risc.*

Nu toate bolile de cancer sînt fatale. De exemplu, mortalitatea în urma cancerului tiroidian indus de radiație este de 5%. pentru cancerul la sîni este de 50%. Riscul total de inducere a cancerului prin iradierea uniformă a întregului corp este de circa 3 ori riscul inducerii unui cancer fatal. Din cauza semnificației sale deosebite, riscul unui cancer fatal este totuși de cel mai mare interes în protecția radiologică. Cunoașterea lui ușurează comparația cu alte riscuri fatale din viață, pe cînd comparația între riscurile nefatale întîmpină dificultăți.

Calculul factorului de risc

Dacă dintr-un grup de 50 000 de persoane fiecare a primit o doză de 2 Sv pentru un anumit organ și dacă au apărut cu 100 de boli de cancer mai mult la acel organ decît în cazul unui grup similar neexpus, factorul de risc ar fi de $\frac{100}{50\,000 \times 2}$, care este 1 la 1 000 per Sv sau 10^{-3} Sv^{-1} în notația științifică.

PUBLICAȚIILE NAȚIUNILOR UNITE

Factorii de risc au fost determinați prin studii efectuate asupra a numeroase grupuri, în special, asupra supraviețuitorilor bombardamentelor atomice din Japonia. S-au obținut și corelat date privind pacienții care au fost expuși la radiații pentru tratamentul unor tumori benigne sau pentru nevoi de diagnostic cu datele referitoare la persoanele expuse unor căderi radioactive intense în Insulele Marshall, cu cele referitoare la minerii din minele de uraniu și la muncitorii din industria luminofoarelor.

Informații de această natură sînt publicate periodic de Comitetul Științific al Națiunilor Unite privind Efectele Radiațiilor Atomice (UNSCEAR), care s-a constituit în anul 1955 și care publică rapoartele către Adunarea Generală. În raportul său din anul 1977, UNSCEAR a publicat estimări ale factorilor de risc pentru cancer fatal ca rezultat al iradierii diferitelor țesuturi. El indică, de exemplu, factorul de risc pentru leucemie — o boală canceroasă a celulelor albe ale sîngelui — de aproximativ 1 la 500 per Sv ($2 \cdot 10^{-3}$ Sv^{-1}). Aceasta înseamnă că dacă o persoană primește un echivalent al dozei

Scanned with OKEN Scanner

de 1 Sv în zona măduvei osoase (cel mai important țesut hematopoetic) există o șansă din 500 ca în cele din urmă el să moară de leucemie ca rezultat al acestei doze. În medie, moartea survine cam la zece ani după primirea dozei (mai mult timp pentru alte forme de cancer). Factorii de risc nu au fost modificați în raportul UNSCEAR din anul 1982.

DEFECTE EREDITARE

Alt efect important al radiației îl reprezintă defectele ereditare, a căror probabilitate, dar nu și periculozitate, depind de doză. Defectele apar prin iradierea gonadelor care produc la bărbați spermatozoizii și la femei ovulele. Radiațiile ionizante induc *mutații*, care sînt de regulă maligne, în aceste celule sau la precursorii lor. Procesele exacte prin care apar mutațiile nu sînt cunoscute, dar ele presupun modificări chimice ale ADN-ului. Defectele ereditare pe care le provoacă aceste mutații se întind de la cele mai serioase, ca întîrzierea mintală severă, pînă la cele banale, cum ar fi pete ale pielii.

Principalele efecte dăunătoare ale radiațiilor
Condiții de apariție și surse de informare

Efect		*Condiție*	*Informație*
Imediate (Precoce)	Moarte Eritem Sterilitate	Doze și debite ale dozelor foarte mari asupra: celei mai mari părți a corpului suprafeței pielii testiculelor și ovarelor	Date privind oamenii, din diferite surse
Ulterioare (Tardive)	Boli maligne	Orice doză sau debit al dozelor. Probabilitatea depinde de doză. Se manifestă peste ani.	Date privind riscul, prin extrapolare liniară din zona dozelor sau a debitelor mari ale dozelor. Diferite sensibilități ale organelor.
	Defecte ereditare	Orice doză sau debit al dozelor. Probabilitate depinde de doză. Manifestată la descendenți.	Date referitoare la oameni prin compensație cu datele privind șoarecii. Limită superioară în cazul oamenilor.
	Modificări nemaligne	Doză foarte mare. Diferite perioade de manifestare.	Date privind oamenii din diferite surse.
	Modificări de dezvoltare	Iradierea embrionului. Se manifestă după naștere	Date limitate privind oamenii.

Scanned with OKEN Scanner

La populația umană apar mutații și în mod spontan, adică fără nici o cauză aparentă, dar radiația de origine naturală poate contribui la aceasta. Totuși, nu a fost găsită nici o evidență directă a defectelor ereditare la urmași imputabile fie radiației naturale, fie celei artificiale. Studii extensive făcute asupra urmașilor supraviețuitorilor bombardamentelor de la Hiroșima și Nagasaki, în mod special, n-au reușit să ne dovedească o creștere statistică semnificativă a defectelor ereditare, dar ne-au dat o estimare superioară a factorilor de risc ai acestor defecte.

În decursul a cîteva decade s-au întreprins, totuși, studii extensive asupra defectelor induse la animale de experiență, șoareci, în special, expunîndu-le pe acestea la radiații ionizante. Aceste studii au acoperit un domeniu larg de doze și de debite ale dozelor. Ele ne dau informații asupra frecvenței cu care sînt induse defecte ereditare la doze cunoscute, iar aceste informații, împreună cu limita superioară din cazul Japoniei, au permis UNSCEAR să estimeze un factor de risc pentru defectele ereditare serioase în cazul oamenilor: valoarea sa este aproximativ 1 la 50 per Sv ($2 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1}) cînd sînt luate în considerație toate generațiile ulterioare iradierii. În anul 1982 s-a raportat o estimare similară. Cam jumătate din aceste defecte vor apărea la copiii și nepoții persoanelor iradiate, ceea ce implică un factor de risc de 1 la 100 per Sv (10^{-2} Sv^{-1}) pentru primele două generații.

Iradierea gonadelor este potențial dăunătoare numai dacă intervine înainte sau în timpul perioadei de reproducere a vieții. Pentru cei care nu vor avea copii nu există, prin definiție, nici un risc ereditar. Procentul de persoane ale unui grup pentru care iradierea gonadelor are semnificație ereditară depinde de vîrsta persoanelor și, astfel, de numărul copiilor pe care este probabil să-i aibă, dar o valoare de 0,4 ar fi potrivită pentru toată populația în general. Astfel, riscul mediu al unor defecte ereditare serioase în primele două generații ar fi de 1 la 250 per Sv ($4 \cdot 10^{-3}$ Sv^{-1}).

RELAȚIILE DINTRE DOZĂ ȘI RISC LA DOZE MICI

Factorii de risc determinați de UNSCEAR provin, în ceea ce privește cancerul, din doze relativ mari primite într-o perioadă scurtă. Asemenea situații nu apar în mod normal: de obicei oamenii sînt expuși la doze relativ mici pe perioade lungi de timp. Astfel, problema care se pune este de a decide care factori de risc sînt, potriviți cu situațiile normale, în care observațiile directe sînt neconcludente.

Cea mai simplă presupunere pentru acest raționament este ca factorul de risc să fie independent atît de doză, cît și de debitul dozei. Aceasta înseamnă că riscul descrește proporțional cu descreșterea dozei (jumătate de doză.

Scanned with OKEN Scanner

jumătate de risc) și nu va fi afectat de întinderea dozei în timp. Pentru anumite radiații, cum ar fi neutronii, aceasta pare a fi o presupunere realistă. Pentru radiațiile beta și gamma, tipurile cel mai adesea întîlnite, există o serioasă evidență că factorul de risc scade la doze mici, dînd o dependență doză-risc neliniară. Cu alte cuvinte, la doze mici, riscurile sînt supraestimate prin ipoteza simplistă a riscului proporțional. În momentul de față nu există un motiv serios pentru a considera că ar exista un prag al dozei sub care să nu poată fi provocate de radiație nici cancerul, nici tarele ereditare. Se consideră atunci că orice doză de radiație produce un risc suplimentar pentru aceste efecte. Pentru alte efecte, în special cele care apar imediat după expunere, există în mod clar un prag de siguranță. Sub acest prag efectele precoce pur și simplu nu apar.

Figura 6 ilustrează relația doză-risc.

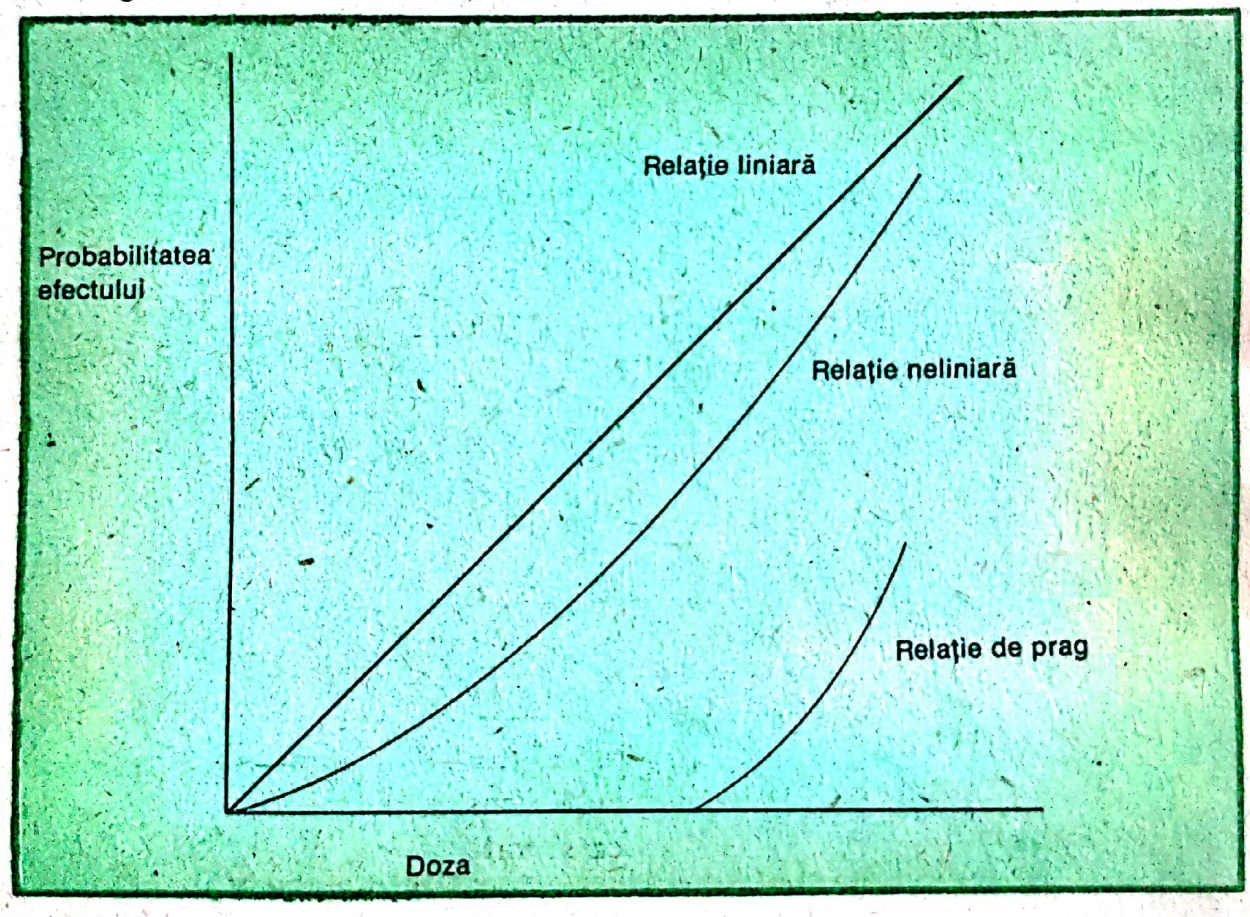


Fig. 6. Relații doză-risc pentru radiație.

Pe scurt, în protecția radiologică se presupune că factorii de risc pentru cancer nu descresc cu descreșterea dozei sau a debitului dozei. Același tip de presupunere se face și în legătură cu factorul de risc pentru defectele ereditare, discutat mai înainte. Aceasta înseamnă, de exemplu, că riscul asociat cu 1 mSv este considerat a fi a mia parte din riscul asociat cu un Sv și că nu

Scanned with OKEN Scanner

contează dacă 1 Sv este primit deodată sau în decursul a cîțiva ani. Mai înseamnă și că orice doză, oricît de mică, creează un risc finit de cancer sau de defecte ereditare.

RECOMANDĂRILE INTERNAȚIONALE

Considerațiile prudente de mai sus stau la baza măsurilor sugerate de Comisia Internațională de Protecție Radiologică (ICRP) pentru protecția populației față de radiația ionizantă. Factorii de risc indicați de comisie, care sînt în concordanță cu cei determinați de Comitetul Națiunilor Unite, sînt prezentați mai jos. Acestea sînt valori reprezentative pentru indivizi dintr-o populație de ambele sexe și un evantai larg de vîrste. Fiecare țesut sau organ contribuie cu o anumită fracție la factorul total de risc de $1{,}65 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1} pentru iradierea întregului corp, și acest fapt stă la baza ponderilor factorilor de risc discutați la început în legătură cu echivalentul dozei efectiv.

Factori de risc pentru defecte ereditare grave la primele două generații și pentru cancer fatal în cazul iradierii diferitelor țesuturi și organe

Țesutul sau organul	*Factor de risc* per Sv	(Sv^{-1})	*Contribuția fracționară*
Gonadele (ereditar)	1 la 250	$(4 \cdot 10^{-3})$	0,25
Sînii	1 la 400	$(2{,}5 \cdot 10^{-3})$	0,15
Măduva osoasă	1 la 500	$(2 \cdot 10^{-3})$	0,12
Plămînii	1 la 500	$(2 \cdot 10^{-3})$	0,12
Tiroida	1 la 2 000	$(5 \cdot 10^{-4})$	0,03
Periostul	1 la 2 000	$(5 \cdot 10^{-4})$	0,03
Restul	1 la 200	$(5 \cdot 10^{-3})$	0,30
Întregul corp	1 la 60	$(1{,}65 \cdot 10^{-2})$	1,00

S-a inclus și factorul de risc pentru defecte ereditare grave la copii și la nepoți, deoarece astfel de vătămări pot fi considerate de persoanele individuale ca fiind tot atît de importante ca și vătămările fatale produse asupra lor înșile.

Valorile sînt date pentru a fi aplicate unei persoane medii, făcînd abstracție de vîrstă sau de sex, dar în cazul indivizilor reali aceste valori depind de vîrstă și de sex: dacă o persoană primește o doză tîrziu, în cursul vieții, cancerul n-ar avea timp să se dezvolte înainte ca persoana să moară din altă cauză, iar în ceea ce privește factorul de risc pentru cancer la sîni, acesta este de două ori mai mare decît valoarea tabelată sau 1 la 200 per Sv ($5 \cdot 10^{-3}$ Sv^{-1}). Totuși, în medie, factorul de risc total pentru cancer, la o expunere uni-

Scanned with OKEN Scanner

formă a întregului corp, este de 1 la 80 per Sv ($1{,}25 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1}). El domină riscul ereditar pentru primele două generații.

RISCUL COLECTIV

O consecință importantă a faptului că am presupus o relație liniară între doză și risc, fără existența vreunui prag, este aceea că doza colectivă devine un indicator al riscului colectiv. În termeni de colectivitate, n-are nici o importanță dacă într-o comunitate de 40 000 de persoane, fiecare primește o doză efectivă echivalentă de 2 mSv sau dacă într-o comunitate de 20 000 de persoane fiecare primește 4 mSv: doza colectivă în fiecare comunitate este de 80 Sv-om și prețul colectiv plătit de fiecare comunitate poate fi o moarte de cancer. Totuși, în termeni individuali, membrii comunității mai mici suportă un risc mai mare.

Vom discuta mai departe, în capitolul 6, utilitatea dozei colective în protecția radiologică.

ALTE EFECTE ÎNTÎRZIATE

Există o categorie de efecte întîrziate care nu presupun un element de probabilitate: un astfel de efect va apărea la un individ dacă primește un echivalent al dozei suficient de mare, iar gravitatea efectului crește cu creșterea dozei. Aceste efecte, de obicei, nu sînt fatale, dar pot fi mutilante sau stînjenitoare. Poate fi împiedicată funcționarea anumitor organe sau se pot induce alte modificări nemaligne: cele mai cunoscute exemple sînt cataracta (opacizarea cristalinului) și defecte ale pielii. O puternică doză echivalentă cumulată, de ordinul a 10 Sv, este în mod normal necesară pentru apariția lor.

IRADIEREA ÎN TIMPUL SARCINII

Trebuie acordată o atenție specială riscului de iradiere a copiilor în uter. Dacă un embrion se expune la radiații se pot induce defecte de creștere, cum ar fi o reducere a diametrului capului sau întîrzierea mintală, dacă expunerea are loc în perioada formării organelor.

Va apărea un risc mărit pentru dezvoltarea unor tumori maligne în timpul copilăriei: factorul de risc este nesigur, dar estimat la circa 1 din 40 per Sv

Scanned with OKEN Scanner

($2{,}3 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1}), de două ori mai mare decît riscul total de cancer al unei persoane medii. Acestea sînt motivele pentru care femeile însărcinate nu au voie să facă radiografii ale abdomenului în afara cazului cînd există motivații clinice pentru a face acest lucru și, de asemenea, există restricții speciale asupra dozelor pe care le pot primi femeile fertile sau însărcinate atunci cînd lucrează în mediu cu radiații.

EVIDENȚA PERSONALULUI CARE LUCREAZĂ CU RADIAȚII

Din cauza modului în care au fost obținuți, factorii de risc folosiți în protecția radiologică pot fi priviți ca aproximativi. De aceea, este esențial să folosim orice împrejurare pentru a testa valabilitatea actualelor estimări. Un mod de a face aceasta este de a studia incidența bolilor maligne fatale în rîndul persoanelor care, prin profesiunea lor, sînt expuse la radiații în condiții controlate. În Marea Britanie dozele primite de personalul din mediu cu radiații sînt în mod obișnuit înregistrate și se determină dozele cumulate. Consiliul Național de Protecție Radiologică a întocmit un Registru național al persoanelor care lucrează cu radiații; în el este înregistrată doza primită în tot cursul vieții și cauza decesului unora dintre aceștia, precum și informații despre incidența cancerului.

Pe măsură ce se acumulează, această informație se analizează pentru a descoperi ce diferențe apar între mortalitatea în rîndul celor ce lucrează cu radiații și aceea a altor grupuri, ca și între grupurile de lucrători cu radiații, dar cu doze cumulate diferite. În particular, se ține evidența cazurilor de cancer în exces și se estimează limite în care sînt cuprinși factorii de risc.

Principala dificultate tehnică într-un astfel de proiect este legată de marea incidență a cancerului în rîndul comunității: aproape 20% din populația Marii Britanii moare de cancer. Deoarece cancerul indus de radiații nu poate fi deosebit de cel care are alte cauze, dificultatea constă în urmărirea unei ușoare diferențe în incidența lui, precum și în prelucrarea acesteia cu mijloace statistice. Cu toate acestea, va fi posibil să se demonstreze, în decursul unei decade, dacă actualii factori de risc sînt puternic subestimați.

6 SISTEMUL DE PROTECȚIE RADIOLOGICĂ

PRINCIPII DE BAZĂ

Modul de abordare a protecției contra radiațiilor este în mod remarcabil cam același în toată lumea. Acest fapt se datorește în mare măsură Comisiei Internaționale de Protecție Radiologică, o organizație științifică autonomă care publică, de peste o jumătate de secol, recomandări privitoare la protecția față de radiațiile ionizante. Autoritatea acestei comisii provine din poziția științifică a membrilor săi, ca și din meritul recomandărilor sale. Guvernele evaluează recomandările și le pun în practică într-o manieră convenabilă țărilor în cauză.

Principiile centrale ale protecției radiologice așa cum sînt exprimate de Comisia Internațională de Protecție Radiologică

1. Nici un procedeu nu va fi adoptat dacă introducerea sa nu aduce un beneficiu net pozitiv.
2. Toate expunerile vor fi ținute la un nivel atît de jos cît este rezonabil, luînd în considerație factorii economici și sociali.
3. Echivalentul dozei individual să nu depășească limitele recomandate de Comisie pentru circumstanțele respective.

Prezentul sistem de protecție radiologică se bazează pe trei cerințe principale. În fiecare din aceste cerințe apar considerente sociale, în primele două explicit, în ultimul implicit; astfel, există considerabil de mult loc pentru factorii de decizie.

SCOPUL APLICĂRII RECOMANDĂRILOR

În principiu, cerințele amintite se aplică tuturor surselor de radiații, dar în practică există anumite restrîngeri. Nu se poate face practic nimic în legătură cu dozele normale ale radiației de origine naturală, dar dozele anormal

Scanned with OKEN Scanner

de mari trebuie evitate. Nimic nu se poate face în legătură cu depunerile radioactive provenind de la experiențele nucleare anterioare, dar în viitor ar trebui să nu se mai facă experiențe în atmosferă. Folosirea radiațiilor în medicină este o problemă care ține de aprecierea clinicianului și ar fi inadecvat să impunem limite dozelor individuale, dar doza colectivă provenind de la tratamentele medicale este mare și clinicienii trebuie să respecte alte cerințe ale Comisiei. Totuși, cerințele amintite se aplică, în întregul lor, numai expunerilor la care sînt supuși cei ce lucrează în mediul radioactiv, expunerii publicului la practici industriale și de altă natură, care presupun folosirea radiațiilor, precum și expunerii publicului la diferite surse artificiale. În acest sens restrîns vor fi discutate aici cele trei principii ale protecției radiologice.

ACCEPTABILITATEA UNUI PROCEDEU

Prima cerință scoate în evidență necesitatea clară de a considera toate efectele negative atunci cînd decidem dacă procedeul sau operația propusă, și care presupune expunerea la radiații ionizante, este acceptabil. Efectele radiațiilor trebuie considerate ca făcînd parte din costurile procedeului și aceste costuri trebuie comparate cu beneficiile. De asemenea, ar fi necesar să se studieze costurile și beneficiile unor moduri alternative de atingere a aceluiași scop, dar fără radiații.

Problema acceptabilității poate fi astfel foarte serioasă, extinzîndu-se dincolo de domeniul protecției radiologice și necesitînd, în ultimă instanță, hotărîrea Parlamentului. Deși a fost legiferat prin statut de mai multe decenii, putem folosi programul energetic nuclear britanic pentru a ilustra acest punct.

Cîteva consecințe radiologice ale programului energetic nuclear au fost descrise în capitolul 4 și anume deversarea radioactivității în mediul înconjurător și dozele primite de către personal. La acestea trebuie adăugată posibilitatea unor accidente la reactorul nuclear, cu frecvență și grad de periculozitate variabile, precum și apariția unor deșeuri puternic active, subiecte ce vor fi discutate în capitolele 7 și 8. Trebuie luate, de asemenea, în considerare și dozele sau accidentele datorite radiațiilor suferite de minerii din minele de uraniu din străinătate, de unde se importă combustibilul nuclear pentru reactori

Trebuie să se facă o comparație cu consecințele unor metode alternative de producere a energiei, de exemplu, prin folosirea cărbunelui. În această industrie energetică bazată pe arderea cărbunelui sînt produse volume mari de deșeuri, substanțe nocive inclusiv radioactivitatea naturală a cărbunelui.

Scanned with OKEN Scanner

sînt deversate în zona centralelor electrice, minerii suferă de boli profesionale și există posibilitatea unor accidente în mină cu anumite frecvențe și grad de pericol.

Mai trebuie luați în considerare factori strategici și economici, de exemplu: diversitatea, securitatea, accesibilitatea și rezervele diferiților combustibili; costurile de construcție și de operare a diferitelor tipuri de centrale; cererea viitoare de electricitate; și, nu în ultimul rînd, dorința persoanelor de a lucra sau nu într-o anumită industrie.

Efectele radiațiilor sînt astfel numai un element într-o problemă atît de complicată cum ar fi acceptabilitatea, dar este esențial ca ele să fie pe deplin recunoscute și să li se dea ponderea corespunzătoare în etapa luării deciziei.

Puțini vor pune la îndoială faptul că folosirea radiațiilor X este acceptabilă în medicină: beneficiile sînt evidente, chiar dacă dozele individuale și colective sînt mari. Cu toate acestea, acceptabilitatea unei proceduri anumite trebuie să fie stabilită: un program pe scară largă de folosire a radiațiilor X, pentru depistarea cancerului la un anumit organ, care ar produce mai multe boli de cancer decît cele pe care le-ar pune în evidență, ar fi inacceptabil. Pentru motivele expuse în capitolul 5, iradierea medicală în timpul sarcinii are nevoie de o puternică justificare și de tehnici adecvate.

Anumite practici, care, prin consens, s-au dovedit a nu satisface prima cerință mai sînt propuse din cînd în cînd. Printre acestea sînt jucăriile și obiectele de bijuterie care conțin material radioactiv. Ele nu sînt acceptate, deși sînt atractive.

REDUCEREA LA MINIM A DOZELOR

Deoarece se consideră că nici o doză de radiație nu este în întregime liberă de risc, nu este suficient de a respecta doar o limită. Și dozele de sub limită necesită atenție și trebuie reduse oriunde și oricînd acest lucru poate fi făcut cu mijloace rezonabile. În cele din urmă, însă, se va ajunge la situația în care alte reduceri nu mai sînt rezonabile, în sensul că ele ar necesita costuri sociale și economice care ar depăși valoarea acestor reduceri.

Acest deziderat a fost folosit în protecția radiologică de peste două decenii cu rezultatul că dozele anuale medii primite de lucrătorii din mediul cu radiații sînt cu o zecime sub limita legală de 50 mSv care a existat în toată această perioadă, deși dozele variază de la un grup de lucrători la altul. Dozele anuale pentru persoanele neangajate în lucrul cu radiații, pentru care doza limită era de 5 mSv, au fost mult sub această valoare, chiar în cazul persoanelor cel mai expuse.

Aceste doze mici provin dintr-o seamă de factori. Deoarece trebuie îndeplinite anumite limite definite, dozele medii vor fi în mod natural mai mici. În

Scanned with OKEN Scanner

multe locuri de muncă schemele de protecţie sînt astfel întocmite încît dozele primite de cea mai mare parte a personalului să fie sub limită. Practicile care produc iradierea persoanelor neangajate direct în lucrul cu radiaţii sînt controlate pe baza unei estimări prudente a dozelor primite de grupurile de persoane cel mai expuse. Astfel de procedee reprezintă căi judicioase, dar cu caracter doar calitativ, din punct de vedere al cerinţei ca dozele să fie ţinute la un nivel cît mai jos posibil.

TEHNICI AJUTĂTOARE DE ANALIZĂ CANTITATIVĂ

În ultimul timp, în aprecierea momentului în care o nouă reducere a dozei ar antrena o folosire nerezonabilă a resurselor în raport cu beneficiile intenţionate prin reducere, s-au folosit din ce în ce mai mult tehnici ajutătoare de analiză cantitativă, cum ar fi analiza cost-beneficiu (vezi caseta). Aceste tehnici nu înlocuiesc raţionamentul profesional sau consensul general, nici nu dau naştere în mod automat unor decizii. Valoarea lor principală constă în structurarea procesului de gîndire şi în îmbunătăţirea consensului general.

Folosirea analizei cost-beneficiu în protecţia radiologică

Să considerăm că un număr de metode sau de variante ale unei metode de reducere a dozei colective, dată de un anumit procedeu ce implică radiaţii, sînt luate pe rînd în considerare. Ele produc în mod progresiv reduceri mai mari ale dozei colective, dar solicită cheltuieli progresiv mai mari. Fiecare creştere a cheltuielilor aduce însă o reducere mai mică a dozei colective. În cele din urmă se ajunge la un punct în care creşterea cheltuielilor necesare pentru o cît de mică reducere a dozei este egală cu valoarea în bani a acestei reduceri. În această situaţie doza colectivă este la nivelul minim rezonabil, o cheltuială în plus n-ar fi justificată, iar protecţia se spune că a fost optimizată.

LIMITE PENTRU DOZE

Al treilea principiu al protecţiei radiologice (vezi tabelul de la p. 38) exprimă obligaţia de a nu expune oamenii şi descendenţii lor la un risc inacceptabil de mare. Acest deziderat se poate îndeplini impunînd o limită strictă echivalentului dozei efectiv pe care îl poate primi o persoană: în cazul unei persoane din mediu de lucru cu radiaţii, limita este de 50 mSv pe an, iar pentru alte persoane această limită este de 1 mSv pe an, deşi sînt permişi în anumiţi ani 5 mSv, dacă media anuală a expunerii pe întreaga viaţă pînă atunci nu depăşeşte 1 mSv. În fapt, aceste limite reprezintă constrîngeri arbitrare aplicate modului de îndeplinire a celui de al doilea principiu, iar valorile limitelor trebuie respectate indiferent de preţul plătit pentru aceasta. Aceste

Scanned with OKEN Scanner

limite au fost impuse pentru a controla incidența acelor efecte ale radiațiilor cum ar fi cancerul și tarele ereditare, ce presupun un element de probabilitate.

În legătură cu limitele dozelor există două idei greșite, foarte răspîndite. Prima este aceea că limitele marchează o modificare bruscă a riscului biologic. Că acest lucru nu este adevărat este clar din discuția prezentată în capitolul 5 privind relația dintre doză și risc, în cazul acestor efecte și din faptul că există, într-adevăr, două limite: limitele sînt alese astfel din considerente sociale. A doua idee greșită este aceea că respectarea limitelor dozelor reprezintă singura cerință importantă a sistemului de protecție radiologică: dimpotrivă, cerința de a menține dozele atît de mici cît este de rezonabil este încă și mai importantă și tocmai impactul lor comun asupra procedeelor acceptate este cel care determină eficacitatea sistemului de protecție radiologică. O situație în care întregului personal i s-ar permite, fără nici o restricție, să primească 50 mSv în fiecare an, ar fi inacceptabilă. În Marea Britanie, normele pentru radiația ionizantă prevăd acest lucru și cer să se efectueze anchete în situațiile în care s-a ajuns la expuneri mai mari de 15 mSv pe an și, respectiv, 30 mSv pe trimestru.

EFICACITATEA PROTECȚIEI

În capitolul 4 s-a arătat că în Marea Britanie echivalentul dozei efectiv mediu primit de o persoană care lucrează în mediu radioactiv este de aproximativ 1,4 mSv pe an. În capitolul 5 s-a văzut că factorul total de risc pentru cancerul fatal este de 1 la 80 per Sv ($1{,}25 \cdot 10^{-2}$ Sv^{-1}). Riscul mediu al cancerului fatal, pe care și-l asumă în Marea Britanie o persoană care lucrează în mediu radioactiv, este de 1 la 57 000 pe an ($1{,}7 \cdot 10^{-5}$ an^{-1}), valoare ce rezultă în urma celor trei principii centrale prezentate mai înainte.

Un mod de a aprecia eficacitatea sistemului de protecție radiologică este de a compara acest risc anual mediu de contractare a unui cancer fatal cu riscul accidentelor fatale din alte profesii. Deși rudimentar, un astfel de criteriu este destul de clar și, în întregul său, prevenitor, deoarece efecte de această natură ale radiațiilor apar mai tîrziu, iar bolile fatale din alte profesiuni sînt ignorate. Facem aici comparația folosind statisticile din ultimele două decenii. Se vede că persoanele care lucrează în mediu radioactiv se încadrează din punct de vedere al riscului de a contracta boli fatale în aceeași categorie ca și persoanele ce lucrează în industria textilă și în industria alimentară, care pot fi considerate industrii relativ sigure. Chiar dacă s-ar adăuga riscul mediu dat în general de radiații peste riscul convențional al profesiei ca atare, riscul total încă ar putea fi privit ca obișnuit. De fapt rata accidentelor datorite bolilor fatale în industria nucleară este de 1 la 70 000 pe an

Scanned with OKEN Scanner

($1{,}4 \cdot 10^{-5}$ an^{-1}). Datele ilustrează bine de ce o expunere prelungită la 50 mSv suferită de un anumit grup de persoane din mediu radioactiv ar fi inacceptabilă: ea ar implica un risc de 1 la 1 600 pe an ($6{,}3 \cdot 10^{-4}$ an^{-1}), ceea ce ar aduce aceste persoane în categoriile de profesii relativ riscante. Astfel, se depune un efort considerabil pentru a reduce expunerile mari în rîndul personalului.

Riscul mediu anual al unui accident prin boli fatale în diferite profesii și al cancerului fatal indus potențial în rîndul persoanelor din mediu radioactiv (date pentru Marea Britanie).

Industriile	*Riscul unui accident mortal* pe an	(an^{-1})
Pescuitul în largul mării	1 la 800	$126 \cdot 10^{-5}$
Extracția cărbunelui[1]	1 la 6 000	$17 \cdot 10^{-5}$
Construcții	1 la 10 000	$10 \cdot 10^{-5}$
Construcții de mașini	1 la 11 000	$9 \cdot 10^{-5}$
Lemn și mobilă etc.	1 la 34 500	$3 \cdot 10^{-5}$
Toate profesiile	1 la 43 500	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$
Textile	1 la 50 000	$2 \cdot 10^{-5}$
Lucrători în mediu radioactiv[2] (1,4 mSv pe an în medie)	1 la 57 000	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$
Alimentară	1 la 59 000	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$
Confecții și încălțăminte	1 la 250 000	$0{,}4 \cdot 10^{-5}$

Cu excepția persoanelor care lucrează în mediu cu radiații, cifrele se bazează pe statisticile: HSE Health and Safety, 1982.
[1] Mineri în subteran și la suprafață.
[2] Estimat, dar neobservat.

PROTECȚIA POPULAȚIEI

În ceea ce privește populația s-a văzut în capitolul 4 că doza anuală primită de persoanele cele mai expuse la deversările radioactive în mediul ambiant este de 1 mSv la mijlocul anului 1980. Aceasta implică un risc mediu al contractării cancerului de 1 la 80 000 pe an ($1{,}25 \cdot 10^{-5}$ an^{-1}).

Acest nivel al riscului, care privește relativ puține persoane din țară, trebuie judecat prin comparație cu riscurile fatale, autoimpuse sau de altă natură, care există în viața de toate zilele. Cîteva dintre aceste riscuri, calculate pentru ultimi ani, sînt prezentate mai jos (cu valori rotunjite), iar pentru a adăuga o anumită perspectivă s-a prezentat și riscul morții din cauze naturale pentru o persoană de 40 ani. În contrast cu riscul de iradiere, aceste riscuri convenționale se aplică unui număr larg de persoane.

RISCUL NAȚIONAL

Doza colectivă primită de întreaga populație a Marii Britanii în urma activităților nucleare, altele decît practicile medicale, este de aproximativ 1 700

Scanned with OKEN Scanner

Sv-om pe an. O asemenea doză efectivă ar implica 20 decese de cancer anual și un număr similar de tare ereditare serioase pentru toate generațiile ulterioare. Acest rău potențial trebuie să fie judecat împreună cu beneficiul național anual rezultat în urma folosirii radiațiilor în industrie sau în alte practici, cu excepția medicinei.

Este bine să ne amintim că doza colectivă dată de radiația naturală este în jurul a 100 000 Sv-om pe an, adică de 60 de ori mai mare.

Riscul anual de deces din cîteva cauze comune în Marea Britanie

Cauza	*Riscul morții* pe an	(an^{-1})
Fumatul a 10 țigări pe zi*	1 la 200	$500 \cdot 10^{-5}$
Cauze naturale, la 40 de ani	1 la 850	$120 \cdot 10^{-5}$
Accidente de circulație	1 la 9 500	$11 \cdot 10^{-5}$
Accidente casnice	1 la 26 000	$4 \cdot 10^{-5}$
Accidente de muncă	1 la 43 500	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$
Expunerea la radiații (1 mSv pe an)	1 la 80 000	$1{,}25 \cdot 10^{-5}$

* Pentru fumat riscul indicat aici include toate efectele nocive ale fumatului; numai pentru cancerul pulmonar riscul este de 50%.

CONTROALE LEGALE

Sistemul de protecție radiologică descris mai sus se aplică astfel tuturor procedurilor ce implică expunerea la radiații și care se pot modifica în mod voluntar. În Marea Britanie el se aplică atît prin legi ale Parlamentului și alte instrumente subsidiare, cum ar fi regulamente, licențe, autorizații și aprobări, cît și prin folosirea specialiștilor în protecția radiblogică în funcții de conducere economică sau guvernamentală. Judecînd prin comparație cu alte proceduri și circumstanțe, se pare că sistemul funcționează tot atît de bine în această țară ca și în altele. Totuși, există o continuă preocupare a opiniei publice în legătură cu securitatea nucleară și se acordă o importanță considerabilă reglementărilor legale.

De la sfîrșitul celui de al doilea război mondial s-a adunat un cod întreg de practici bune și de reglementări juridice. Diferitele legi, regulamente și ordine sînt însoțite de instrucțiuni de utilizare corectă și de literatură de specialitate. Practic, este abordată orice metodă, de la funcționarea centralelor electrice nucleare pînă la folosirea instalațiilor de radiații X pentru controlul animalelor.

Acest sistem de controale a fost întărit prin obligațiile ce decurg din calitatea Marii Britanii de membru al Comunității Economice Europene*.

* Piața Comună (N.T.)

Scanned with OKEN Scanner

Aceste obligații sînt specificate în standardele principale de siguranță privind personalul muncitor și publicul larg, cărora statele membre ale C.E.E. sînt obligate să li se conformeze. Standardele acestea nu diferă, în esență, de controalele care s-au dezvoltat la scară națională; și unele, și celelalte derivă din recomandările ICRP

Consiliul Național de Protecție Radiologică informează guvernul Marii Britanii asupra acceptabilității recomandărilor ICRP pentru aplicare în țară. Așa s-a procedat în legătură cu sistemul de protecție radiologică prezentat aici. În această privință, funcția Consiliului este consultativă: responsabilitatea formulării și aplicării controalelor legale se află în altă parte.

În general, responsabilitatea guvernamentală în domeniul protecției radiologice cade în sarcina miniștrilor și a subordonaților acestora din domeniul structurii politice și administrative a cercetării științifice a diferitelor ministere. Acest fapt prezintă avantajul că riscurile radiologice sînt luate în considerare în context cu alte riscuri de care se ocupă ministerul respectiv, iar un sfat specializat se poate obține de la Consiliul Național de Protecție Radiologică.

Același procedeu este evident în controlul riscurilor provocate de folosirea radiațiilor în producție și de instalațiile nucleare, cum ar fi reactorii. Această responsabilitate cade în sarcina Comisiei pentru Sănătate și Protecția Muncii, reprezentată de un consiliu executiv, care folosește inspectori pentru a pune în aplicare diferite dispoziții regulamentare. Radiația reprezintă, totuși, numai unul dintre numeroasele riscuri profesionale și industriale care sînt supuse reglementării și inspecției, iar aplicarea protecției radiologice se încadrează în această schemă generală. Comisia consultă Consiliul Național de Protecție Radiologică.

De la crearea sa, Consiliul a informat fabricanții și comercianții de bunuri de consum ce conțin material radioactiv dacă produsele lor pot fi acceptate sau nu. Aceștia nu sînt totuși obligați legal să respecte respectivele recomandări. În momentul cînd scriem aceste rînduri există propunerea de a se introduce reglementări prin care bunurile de consum ce conțin substanțe radioactive să fie aprobate de către Consiliu.

Scanned with OKEN Scanner

7 REACTORII NUCLEARI

Dozele pe care populația le primește prin intermediul deversărilor radioactive ca rezultat al programului energetic nuclear sînt prezentate în capitolul 4 și tot acolo sînt discutate dozele primite de cei ce lucrează în industria nucleară. În acest capitol vom lua în considerație un alt aspect al energeticii nucleare și anume securitatea reactorilor nucleari.

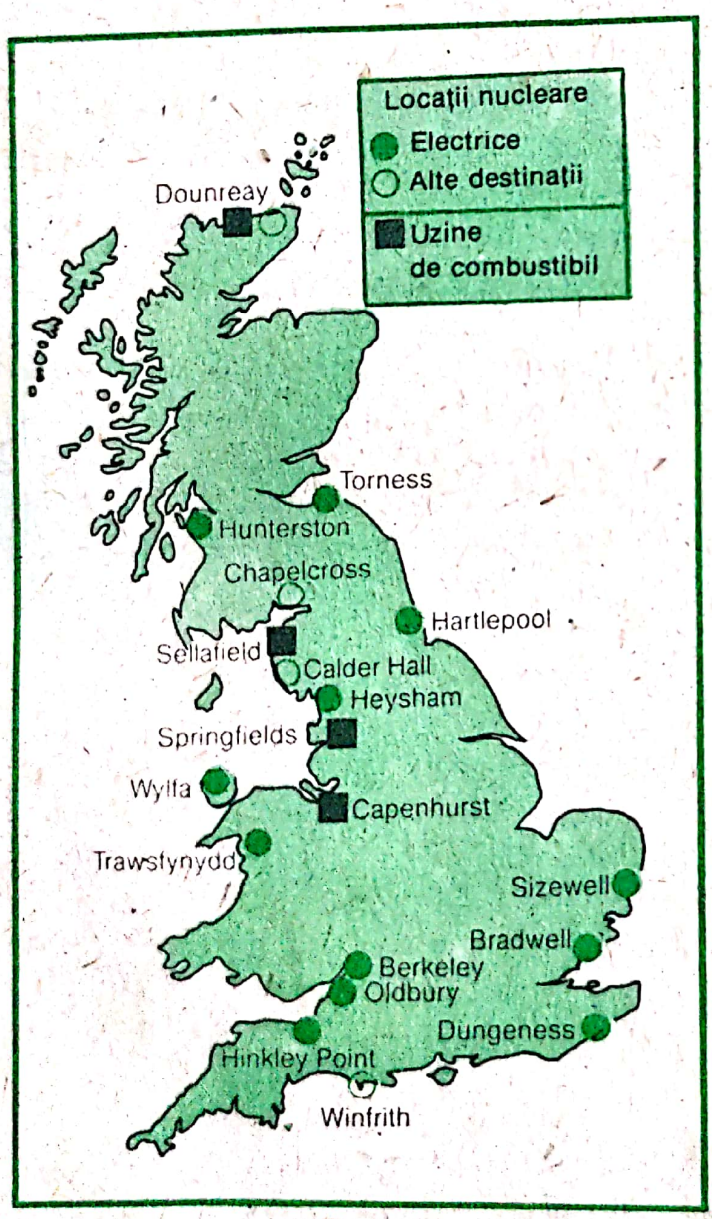


Fig. 7. Locurile unde se află centrale nucleare și uzine de combustibili nucleari.

Scanned with OKEN Scanner

PROGRAMUL ENERGETIC

Reactorii nucleari au fost folosiți pentru producerea electricității încă din anii cincizeci. Consiliul Electricității are acum în funcțiune 14 centrale electrice nucleare în diferite locuri din Marea Britanie, fiecare conținînd doi reactori; încă două stații se află în construcție, numărul total de amplasamente fiind 12. Cînd aceste centrale vor fi în funcțiune circa 20% din energia electrică generată în Marea Britanie va fi de origine nucleară.

Societatea Britanică de Combustibili Nucleari precum și Comitetul Național pentru Energia Atomică din Marea Britanie exploatează și ele un număr de reactori nucleari ce furnizează o anumită cantitate de electricitate rețelei naționale (fig. 7).

TIPURI DE REACTORI

Reactorii nucleari sînt denumiți așa deoarece ei depind în funcționarea lor de o reacție între neutroni și nucleele atomice ale combustibilului. Există două tipuri: reactori cu neutroni termici și reactori cu neutroni rapizi sau, pe scurt, *reactori termici* și *rapizi*. Acești termeni se referă la energia neutronilor care sînt implicați în procesul nuclear. *Neutronii termici* sînt aceia care au o energie joasă, în timp ce *neutronii rapizi* au o energie înaltă.

Uraniul este alcătuit în principal din nucleele a doi izotopi: uraniu-235 (0,7%) și uraniu-238 (99,3%). Cînd un neutron termic pătrunde într-un nucleu de uraniu-235, îl obligă pe acesta să sufere o *fisiune*, adică să se despice în două fragmente *(produse de fisiune)* cu energie mare, precum și să elibereze cîțiva alți neutroni de mare energie și radiații gamma (vezi fig. 8). Neutronii termici care pătrund în nucleul de uraniu-238 produc uraniu-239, care în cele din urmă se dezintegrează în plutoniu-239.

Un reactor termic funcționează cu combustibil format din uraniu în care concentrația de uraniu-235 este egală sau puțin mai mare decît concentrația naturală de 0,7%. Neutronii termici produc fisiunea uraniului-235. Neutronii rapizi care rezultă nu sînt tot atît de capabili de a produce fisiunea și, de aceea, sînt încetiniți făcîndu-i să treacă prin apă sau grafit pînă cînd — prin ciocniri succesive — devin termici și pot provoca o nouă serie de fisiuni, dînd naștere astfel unei reacții în lanț autoîntreținute. O parte din neutronii rapizi sînt capturați de nucleele, mult mai abundente, ale uraniului-238, creîndu-se plutoniu. Cantitatea de plutoniu creată este cu puțin mai mică decît cantitatea de uraniu-235 consumată prin fisiune.

Neutronii rapizi sînt mai puțin eficaci în producerea fisiunii, chiar pentru uraniu-238. Cu toate acestea, cînd concentrația nucleelor fisionabile de uraniu-235 sau de plutoniu-239 este mare, se pot folosi neutronii rapizi direct într-un

Scanned with OKEN Scanner

reactor rapid, evitîndu-se astfel folosirea apei sau a grafitului ca în reactorul termic. Un reactor rapid încărcat cu un combustibil conținînd plutoniu-239 și uraniu-238 produce energie prin consumarea prin fisiune a plutoniului, dar în același timp produce mai mult plutoniu prin captura neutronică în uraniu-238. Astfel, un reactor rapid produce ceva mai mult plutoniu decît consumă.

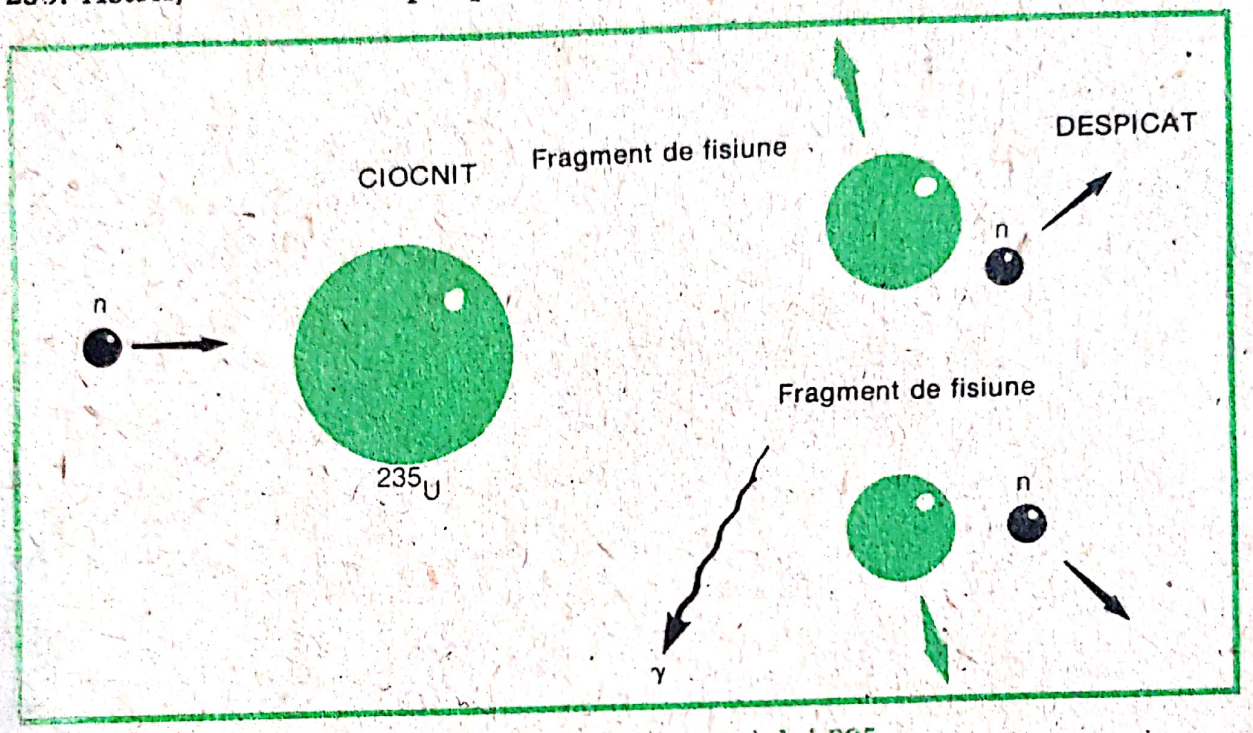


Fig. 8. Reprezentarea schematică a fisiunii uraniului-235.

Pe scurt, un reactor termic folosește proporția mică de uraniu-235 din natură pentru eliberarea de energie și producere de plutoniu-239. Aproape tot uraniul-238, izotopul cel mai comun, rămîne ca deșeu. Un reactor rapid poate consuma plutoniu-239 prin fisiune, eliminînd energie și convertind uraniul-238, altfel nefolositor, în și mai mult plutoniu. Folosirea combinată a reactorilor termici și rapizi poate produce de circa 100 de ori mai multă energie din uraniul natural original decît s-ar obține din folosirea doar a reactorilor termici. Reactorul rapid folosește plutoniul produs în reactorii termici, astfel încît bilanțul final al plutoniului este mai mic cu un program de reactori micști decît ar fi cu un program compus doar din reactori termici.

Materialele nucleare existente la acești reactori includ: uraniu natural; *uraniu îmbogățit*, în care concentrația izotopului uraniu-235 este crescută prin procese de separare izotopică; *uraniu sărăcit*, în care a scăzut conținutul de uraniu-235 fie prin folosire în reactor, fie prin scoaterea uraniului-235 pentru a produce uraniu îmbogățit; plutoniu-239, produs în reactori; produse de fisiune, care sînt aproape toate puternic radioactive; un număr de alți nuclizi creați prin procese colaterale, cum ar fi captura succesivă a neutronilor de către plutoniu. Ultimul proces produce izotopii unor elemente artificiale ca americiu și curiu.

Scanned with OKEN Scanner

Prototipuri de reactori rapizi au fost proiectate și experimentate la Dounreay în Scoția, ca și în Franța, R.F. Germania și U.R.S.S.

SCHEMA REACTORULUI

Într-un reactor combustibilul este aranjat într-o rețea numită miez. Miezul mai conține și materialul care reduce (sau moderează) viteza neutronilor și care se numește *moderator*. Căldura degajată prin fisiune este preluată din

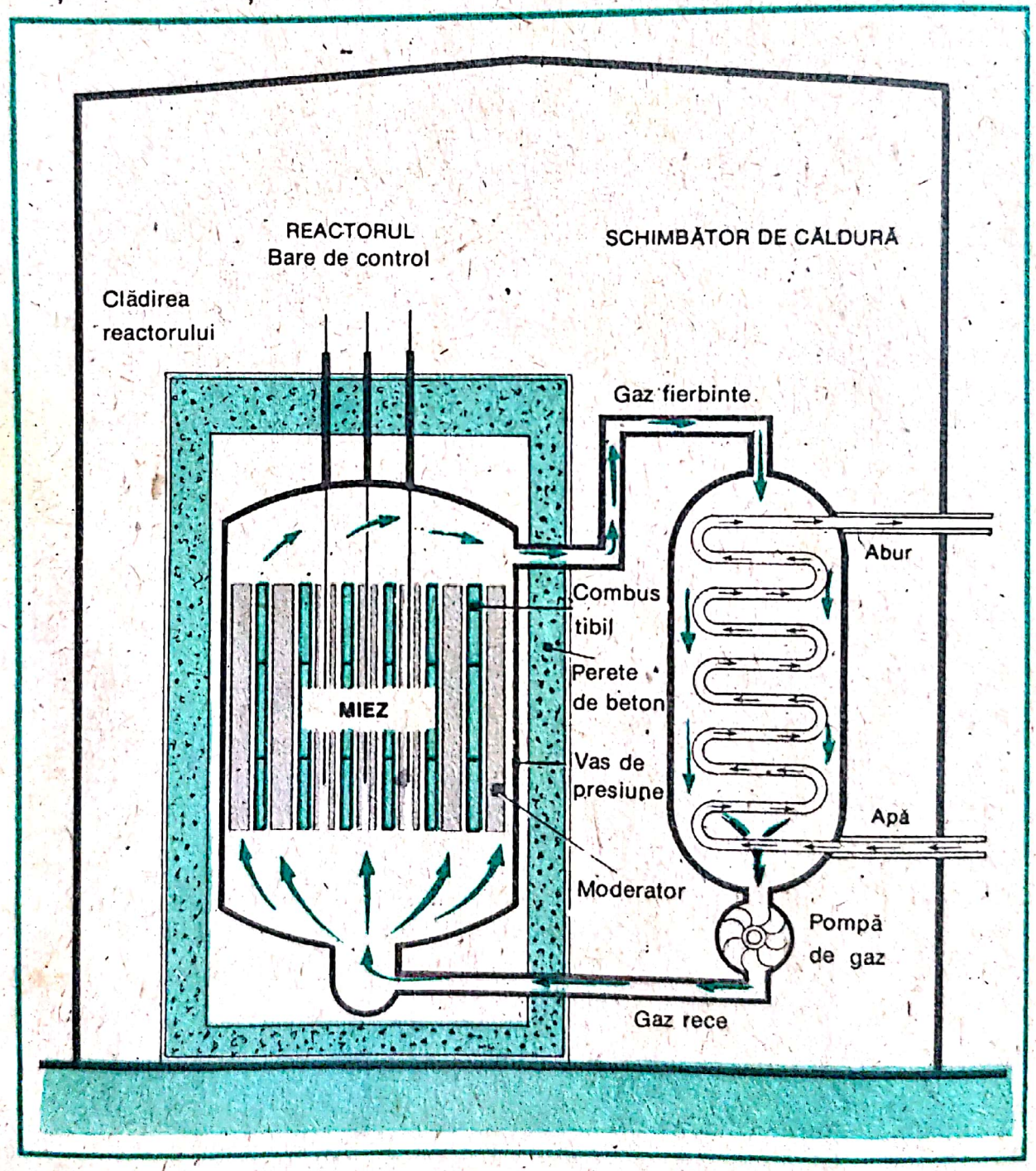


Fig. 9. Diagrama schematică a reactorului nuclear răcit cu gaz, de tipul Magnox.

Scanned with OKEN Scanner

miezul reactorului de un agent de răcire. Funcționarea reactorului este reglată în special prin mișcarea unor bare de control, aflate de asemenea în miez, care au rolul de a absorbi neutroni: ele permit reactorului să fie pus în funcțiune, să fie menținut în funcțiune și să fie oprit atunci cînd este necesar. Și temperatura miezului are un efect de reglare. Cînd reactorul este în funcțiune, reacția în lanț se autoîntreține: un neutron eliberat într-un proces de fisiune produce, în medie, o altă fisiune (fig. 9).

În reactorii termici proiectați în Marea Britanie, moderatorul este grafitul, iar agentul de răcire este bioxidul de carbon sub presiune. În multe alte țări se folosește apă sub presiune atît ca moderator cît și ca agent de răcire pentru reactorii termici; acest tip de reactor se numește *reactor cu apă sub presiune* (Pressurised Water Reactors — PWR) și se va construi de asemenea și în Marea Britanie. Agentul de răcire este trecut printr-un schimbător de căldură, pentru a produce aburul care să pună în mișcare turbina generatorului electric. În anumite tipuri apa este lăsată să fiarbă în miezul reactorului, iar aburul este condus direct la turbine.

Miezul unui reactor comercial poate conține de la o sută pînă la cîteva sute de tone de combustibil. În Marea Britanie *reactorii răciți cu gaz* (Advanced Gas-cooled Reactors — AGR) conțin, în medie, peste 100 de tone de oxid de uraniu îmbogățit. Mai vechii *reactori Magnox* conțin, în medie, peste trei sute de tone de uraniu metalic în compoziție naturală. Combustibilul este închis în vase metalice, iar miezul este introdus într-un vas sub presiune. Reactorii Magnox și-au căpătat numele după aliajul de magneziu din care sînt făcute tecile barelor de combustibil. Barele de combustibil se află într-o incintă blindată (mantaua reactorului) înconjurată cu ziduri groase, masive, de beton pentru a obține o protecție față de radiațiile intense care ar putea fi emise de miez. Reactorii și, practic în toate cazurile, schimbătoarele de căldură se află în clădirea reactorului.

RADIOACTIVITATEA ȘI PUTEREA DEZVOLTATĂ

Combustibilul proaspăt este doar ușor radioactiv și se poate manipula fără ecranare. Activitatea inițială în centrul reactorului este de 10^{13} Bq. Dacă reactorul a fost pentru cîtăva vreme în funcțiune, activitatea a crescut, totuși, de circa 10 milioane de ori, pînă la aproximativ 10^{20} Bq. Aceste creșteri masive de activitate se datoresc în special apariției în interiorul combustibilului a produselor de fisiune. Se explică astfel de ce este nevoie de atîta ecranare în jurul miezului și de ce este vital ca diferitele incinte să nu se fisureze.

În reactor se dezvoltă o cantitate enormă de energie. Puterea termică a unui AGR tipic, de exemplu, este de 1500 MW (1500 milioane de wați),

Scanned with OKEN Scanner

echivalentă cu puterea disipată de 1,5 milioane de radiatoare electrice cu o singură bară. Deoarece volumul miezului unui AGR este de circa 550 m^3, este vital ca modalitatea de extragere a căldurii degajate să fie eficace și continuă; altfel tecile combustibilului precum și combustibilul însuși se pot topi și pot elibera radioactivitate. Este, de asemenea, vital ca reactorul să fie controlat astfel încît rata de producere a energiei termice să nu depășească capacitatea sistemului de răcire, iar reactorul să poată fi închis rapid și sigur în eventualitatea unui accident incipient.

Chiar cînd se oprește un reactor din funcționare, produsele de fisiune din combustibil continuă să genereze căldură prin dezintegrare radioactivă. Imediat după oprire, puterea produsă reprezintă circa 7% din puterea de lucru, deși aceasta se reduce mai departe în timp; este nevoie astfel în continuare de răcire pentru a împiedica topirea elementelor combustibile.

Caracteristicile reactorilor termici

Combustibil:	uraniu natural sau îmbogățit cu izotopul uraniu-235
Procesul:	fisionarea uraniului-235 cu neutroni termici
Moderator:	grafit, apă etc.
Agent de răcire:	bioxid de carbon, apă etc.
Produse secundare:	plutoniu, uraniu sărăcit, deșeuri radioactive.

SECURITATEA REACTORULUI

Astfel, mecanismele principale care privesc securitatea reactorului sînt controlul, răcirea și încasetarea. Reactorii trebuie să fie proiectați, construiți și exploatați în așa fel încît probabilitatea ca aceste mecanisme să cedeze și, în consecință, să se răspîndească radioactivitate în mediul înconjurător, să fie foarte mică.

În Marea Britanie acest obiectiv a fost urmărit pe parcursul a 450 ani-reactor de experiență a Departamentului Electricității în utilizarea reactorilor Magnox și AGR și aproape 250 ani-reactor de experiență cu nouă reactori similari ai Comitetului Național pentru Energie Atomică și ai Companiei Britanice de Combustibili Nucleari. În Marea Britanie s-au proiectat și construit circa 37 reactori termici de putere, care au funcționat aproape 700 ani-reactor fără vreun accident care ar fi implicat o expunere serioasă a personalului sau a populației. Cifra (700) reprezintă suma tuturor anilor de funcționare a tuturor reactorilor din Marea Britanie pînă în anul 1986.

Această trecere în revistă, deși încurajatoare, nu reprezintă o garanție pentru securitatea viitoare, nici nu constituie o demonstrație a acceptabilității unei probabilități mici a accidentelor. Pentru a ilustra cele spuse trebuie doar

Scanned with OKEN Scanner

să ne aducem aminte că un predecesor al reactorului britanic răcit cu gaz a suferit un accident grav în Windscale (acum Sellafield), Cumbria, în anul 1957, în care caz combustibil supraîncălzit și produse de fisiune cu activități mari au fost expulzați în atmosferă, cel mai important fiind iodul-131. Mai mult, în anul 1979, un reactor cu apă sub presiune din Three Mile Island, Pennsylvania (S.U.A.), a suferit o defecțiune importantă a miezului, care a avut ca rezultat eliberarea în atmosferă a unei cantități moderate de gaze radioactive. În nici unul din cazuri n-a fost nimeni rănit grav, dar trebuie acceptat faptul că fiecare accident a creat un anumit risc pentru efecte dăunătoare întîrziate asupra populației.

Totuși, explozia reactorului de la Cernobîl din aprilie 1986 a provocat decese precoce ale unor persoane din zona reactorului, datorite dozelor foarte mari de radiație. Mai mult, norul radioactiv s-a întins peste unele țări din Europa, ducînd la o contaminare măsurabilă a mediului și a alimentelor. În anumite zone din U.R.S.S. dozele au putut fi suficient de mari pentru ca anumite efecte vătămătoare asupra populației să poată fi detectate în decursul timpului.

CONSECINȚELE UNUI ACCIDENT NUCLEAR

Un reactor nuclear sau o instalație care prelucrează combustibil nuclear consumat sau deșeurile nucleare nu poate exploda ca o bombă atomică. Principalul pericol potențial rezidă în produsele de fisiune care se acumulează în combustibilul nuclear în timpul funcționării reactorului. În eventualitatea cedării sistemelor de securitate și a dispozitivelor încorporate în centrala nucleară, o mică fracțiune din aceste produse ar putea fi eliberată în mediul înconjurător. Proiectele centralelor nucleare încorporează o serie de bariere de siguranță împotriva emisiei de radioactivitate, ce constituie un sistem de apărare eșalonat în adîncime împotriva defectelor și a avariilor potențiale. Cu cît este mai mare pericolul cu atît mai stringente devin măsurile de siguranță și astfel riscul expunerii populației la radiație este făcut cît se poate de mic.

Se are în vedere ca în cazul unui accident la o centrală nucleară cel mai probabil nimeni să nu fie vătămat, pentru că cel puțin una dintre barierele de siguranță trebuie să împiedice ca accidentul să ajungă în stadiul în care să aibă loc o degajare semnificativă de radioactivitate. Inspectoratul Instalațiilor Nucleare* are sarcina de a efectua o analiză a detaliilor de securitate pentru fiecare centrală nucleară înainte de a fi construită, astfel încît să se asigure că protecția necesară este prevăzută prin proiecte. Această analiză identifică accidentele potențiale sau lanțurile de accidente în care ar putea apărea avaria totală sau parțială a barierelor de securitate, unele dintre ele conducînd

* Din Marea Britanie (N.T.).

Scanned with OKEN Scanner

la eliberarea de radioactivitate cu riscul corespunzător la care se expune populația. Deși astfel de lanțuri de accidente sînt extrem de improbabile, ele sînt folosite ca model pentru a vedea cît sînt de adecvate sistemele de protecție și de securitate implantate în centrala nucleară, cîteodată fiind denumite „accidente proiectate" (design based accident — dba). Acel dba care conduce la cele mai mari scăpări de radiație la distanță se numește „accident de referință". Pentru aceste accidente potențiale sînt pregătite planurile de urgență. E posibil să se imagineze chiar evenimente și mai improbabile care ar conduce la emisie mai mare de radiații. Probabilitatea acestor evenimente este, însă, atît de mică încît proiectarea unor măsuri suplimentare de securitate care ar reduce șansele lor de apariție sau o extindere a planurilor de urgență ar fi greu de justificat. Totuși, planurile de urgență stabilite pentru accidentele de referință constituie răspunsul de bază pentru orice stare de urgență apărută într-o centrală nucleară și pot fi extinse în cazul în care ar apărea o astfel de necesitate.

Dacă un accident într-o centrală nucleară conduce la o degajare de radioactivitate în atmosferă, vînturile locale vor transporta anumiți izotopi gazoși sau volatili, radioactivi, ca xenon, kripton, iod și cesiu. Emisia ar putea avea loc într-un interval de timp relativ scurt, dar se poate întinde pe cîteva ore sau chiar mai mult în funcție de tipurile de operații ce se efectuează în centrală și de mecanismul de emisie. Materialul radioactiv nu va fi sesizabil cu simțurile omului, dar se va comporta într-un mod similar unui nor de fum, dispersîndu-se în atmosferă și depunîndu-se parțial pe pămînt. Concentrația substanțelor radioactive din nor descrește repede cu distanța, dar urme de material radioactiv se pot găsi la mari distanțe de locul accidentului.

Radioactivitatea norului prezintă un risc al expunerii la radiație în trei moduri diferite. Primul — din expunerea externă la radiația emisă de substanțele din norul purtat de vînt și de materialul depus pe pămînt, ca și pe populația ce se afla în calea norului; al doilea — din expunerea internă la radiație prin inhalarea de substanțe radioactive din nor; al treilea — pe o întindere mai mare de timp, dintr-un posibil consum al alimentelor contaminate și a apei de băut.

Cantitatea de radiație emisă într-un accident de referință n-ar putea provoca vătămări imediate populației. Radiația directă din norul radioactiv sau din materialul depus de el n-ar prezenta o primejdie semnificativă, dar poate fi necesar să se ceară populației din vecinătatea accidentului să se adăpostească sau să ia tablete de iodură de potasiu, ori să evacueze temporar locuințele pentru a limita expunerea la radiații. Tabletele de iodură de potasiu vor inhiba asimilarea de iod radioactiv care, inhalat sau ingerat, se acumulează în glanda tiroidă. Ar putea fi necesar să se introducă restricții în distribuirea laptelui produs în zonă sau a altor alimente pînă la circa 20 km de la locul

Scanned with OKEN Scanner

accidentului și să se prevină expunerea din partea acestor surse. Aceste măsuri ar asigura ca nici o persoană să nu fie expusă la un risc semnificativ pentru sănătate. Totuși, în timpul trecerii și a dispersării norului mase mari de oameni la distanțe mari de locul accidentului vor fi expuse la doze foarte mici de radiație. Cu presupunerea că și cea mai mică expunere la radiație poartă cu ea un anumit risc pentru sănătate, există posibilitatea statistică a cîtorva decese suplimentare de cancer pentru întreaga populație expusă, în decursul următorilor 20 — 30 de ani.

Dacă emisia accidentală de radioactivitate ar depăși valoarea celei pentru accidentul de referință, primejdia norului s-ar extinde pe o zonă mai mare și ar fi necesare acțiuni mai energice pentru protejarea populației. Expunerea la radiația norului sau a materialului depus pe sol va avea o semnificație mai mare, iar planurile de evacuare vor fi mai extinse și vor rămîne în vigoare pe o durată mai mare de timp. Restricțiile în distribuirea laptelui și a alimentelor se vor introduce într-o zonă mai mare. În eventualitatea că aceasta s-ar întîmpla, planurile de urgență vor acorda ajutorul imediat necesar în vecinătatea locului accidentului și vor forma baza de acțiune pe o scară mai mare.

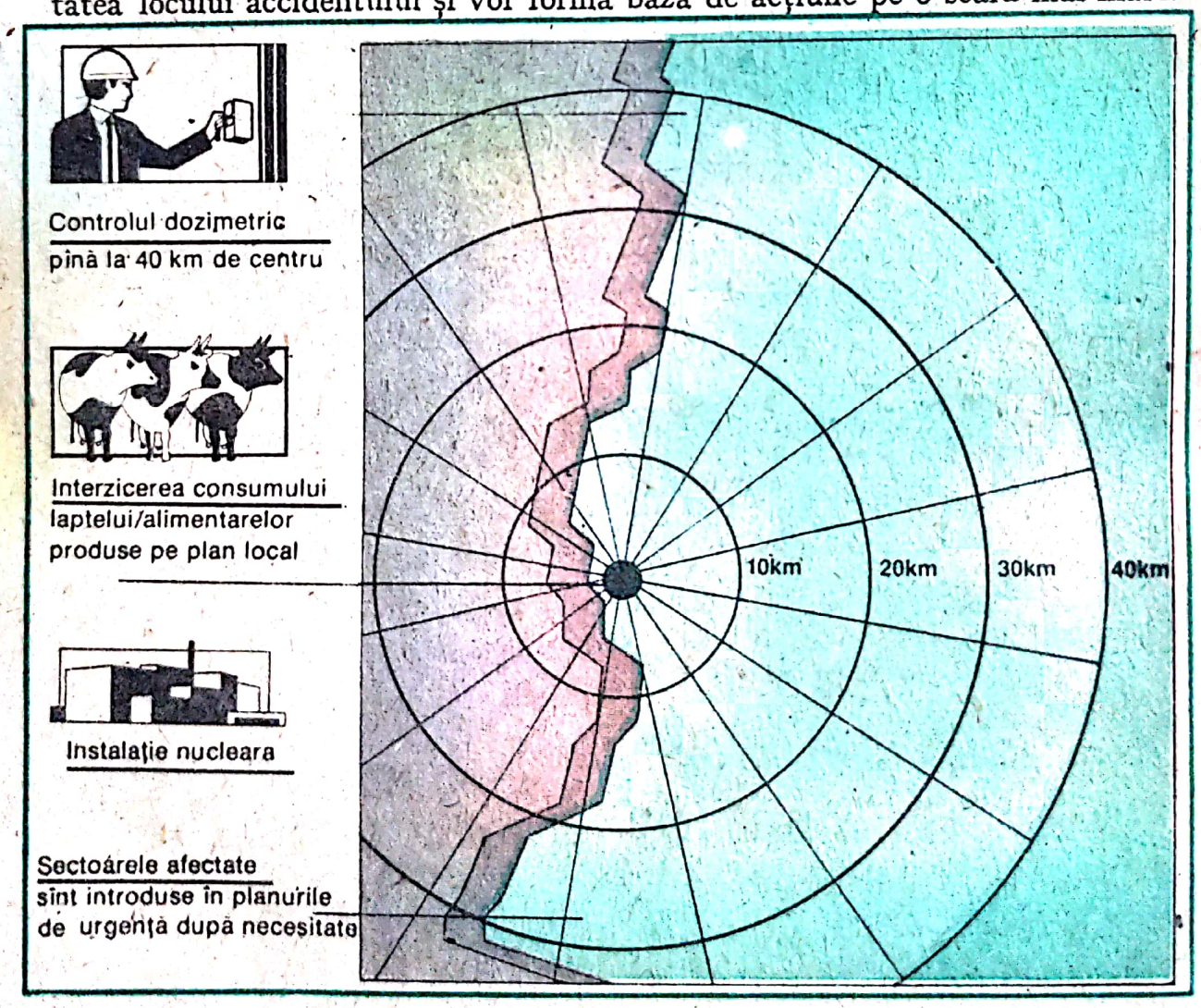


Fig. 10. Sectoarele de necesitate în jurul unei instalații nucleare, pînă la 40 km de zona centrală.

Scanned with OKEN Scanner

Totuşi, nu putem să nu accentuăm cu putere faptul că probabilitatea de producere a unui accident suficient de sever, pentru a implica populaţia din imediata vecinătate a centralei, este într-adevăr foarte mică. Standardele foarte înalte de siguranţă folosită în proiectarea şi în construcţia centralelor nucleare, ca şi controlul strict al funcţionării asigură un înalt grad de încredere că astfel de accidente nu vor avea loc. Planurile de urgenţă ne dau o asigurare în plus că şi dacă ar exista o emisie accidentală de radioactivitate, totul este pregătit pentru o acţiune promptă de protecţie a populaţiei.

CUM SE POATE FACE UN PROIECT ASIGURAT LA ACCIDENTE

Descrierea de mai înainte a unei scurgeri ipotetice majore de radioactivitate subliniază necesitatea ca proiectanţii reactorilor nucleari să analizeze cu stringenţă defectele ce ar putea apărea în timpul exploatării, iar autoritatea care avizează (în cazul Marii Britanii — Departamentul pentru Sănătate şi Securitate a Sănătăţii) să confirme aceste analize. Defectele posibile se întind de la acelea care n-ar provoca nici o scurgere de radioactivitate la acelea care ar provoca scurgeri triviale pînă la scurgeri majore. Defecţiuni cu gravităţi diferite vor avea diferite probabilităţi matematice de apariţie, iar proiectanţii trebuie să aprecieze aceste probabilităţi folosindu-se de datele teoretice şi experimentale şi să se asigure că ele sînt sub nivelul cerut.

Atitudinea actuală a Departamentului Sănătăţii şi Securităţii Sănătăţii faţă de avizarea reactorilor este de a cere ca aceştia să fie astfel proiectaţi şi exploataţi încît probabilitatea de apariţie a unui accident să fie cît mai mică în condiţii rezonabile. Această cerinţă ţine cont de cel de al doilea principiu al protecţiei radiologice. Dîndu-şi avizul, Departamentul se interesează de o proiectare şi o exploatare care să reducă progresiv probabilitatea unor accidente din ce în ce mai severe. Departamentul a publicat normele de securitate pentru noii reactori. Ele includ indici numerici pentru accidentele puţin grave, dar în cazul accidentelor majore cerinţa de bază este de a face o analiză de la caz la caz. Este clar că probabilitatea acceptată pentru un accident major trebuie să fie foarte mică pentru a satisface, în această problemă, nevoile societăţii.

MĂSURI PENTRU CAZURI DE FORŢĂ MAJORĂ

Chiar dacă probabilitatea unui accident este mică, prudenţa cere să existe un plan de măsuri pentru cazul cînd se întîmplă un accident la o centrală nucleară.

Scanned with OKEN Scanner

Planurile de măsuri sînt cerute expres de lege și există la fiecare centrală nucleară din Marea Britanie. Ele sînt rezultatul unei acțiuni de cooperare între personalul autorității care avizează și al autorităților locale și a serviciilor de urgență. Aplicarea unor asemenea planuri este facilitată de organizații numite Comitete locale de legătură, cu membri care reflectă organizațiile locale și la nivel de provincii, care vor fi implicate în protejarea populației în cazul unui accident grav. Desigur că în cazurile serioase vor fi implicate și autoritățile centrale, ca: Inspectoratul Instalațiilor Nucleare, Ministerul Energiei și Mediului, Ministerul Agriculturii, Pescuitului și Industriei Alimentare, Consiliul Național de Protecție Radiologică, pentru a da consultații și asistență după cerințe.

Din asemenea planuri reies ca fiind esențiale măsuri privind o recunoaștere cît mai rapidă a mărimii și naturii scurgerilor radioactive, dispersia lor în mediu, precum și dozele care ar putea apărea. Pentru diferite nivele ale dozelor se pot lua contramăsuri cum ar fi obligarea populației să nu iasă din casă, administrarea tabletelor cu iod stabil pentru protejarea tiroidei, interzicerea consumului anumitor produse locale — cum ar fi laptele — și evacuarea unor zone. La scară națională, Consiliul Național de Protecție Radiologică va efectua și coordona o minuțioasă cercetare dozimetrică a mediului pentru a liniști populația care locuiește în zonele neafectate și a face o evaluare a întregului impact al accidentului.

CUM SE ALEGE UN AMPLASAMENT

Există mulți factori sociali și tehnici care concură la alegerea amplasamentului unei centrale nucleare, printre cei mai importanți fiind cei privind securitatea. Printre primele considerații sînt densitatea populației din vecinătate și ușurința cu care ar putea fi puse în aplicare planurile de urgență.

Primii reactori din Marea Britanie au fost plasați în locuri îndepărtate și încă mai există această politică prudentă de așezare a noilor reactori în locuri îndepărtate. Totuși, mai tîrziu, reactorii termici au fost construiți în locuri semiurbane, care satisfac anumite criterii exprimate de Departamentul pentru Sănătate și Securitate a Sănătății.

PERSPECTIVE ALE SECURITĂȚII REACTORILOR

Pentru a accepta programul energetic nuclear este esențial faptul ca probabilitatea unor accidente ce prezintă un risc pentru sănătatea publică să fie foarte mică, atît în termeni absoluți, cît și în raport cu riscurile ce apar în alte

Scanned with OKEN Scanner

industrii. Nu poate exista, desigur, o încredere absolută în securitatea reactorilor (ca și a oricărei instalații industriale), dar riscul poate fi redus printr-o proiectare ingenioasă, o analiză atentă a defectelor posibile, precauție în alegerea amplasamentelor, grijă în construcție, vigilență în exploatare, rigoare în avizare și un plan cuprinzător în caz de urgență. Pe scurt, trebuie folosită la maximum abilitatea inginerească pentru a satisface așteptările societății în problema securității. Pe de altă parte, societatea trebuie să decidă dacă acceptă să depindă de priceperea și asigurările inginerilor pentru atingerea unui nivel acceptabil de scăzut al riscului sau să abandoneze programul și să se îndrepte spre alte surse de energie. O asemenea dependență nu este specifică numai ingineriei nucleare: securitatea avioanelor, a automobilelor și a tuturor instalațiilor industriale ține seama de ea.

Scanned with OKEN Scanner

8 DEȘEURI RADIOACTIVE

În capitolul 4 am discutat deversările de rutină ale radioactivității în aer și în apă ca rezultat al programului energetic nuclear și s-au prezentat valorile estimative ale dozelor. În acest capitol vom discuta prelucrarea și deversarea altor deșeuri, în special solide, care apar în ciclul combustibilului nuclear.

CICLUL COMBUSTIBILULUI NUCLEAR

Combustibilul necesar reactorilor termici se prepară dintr-un compus chimic al uraniului procurat în Marea Britanie din import. După ce stă un

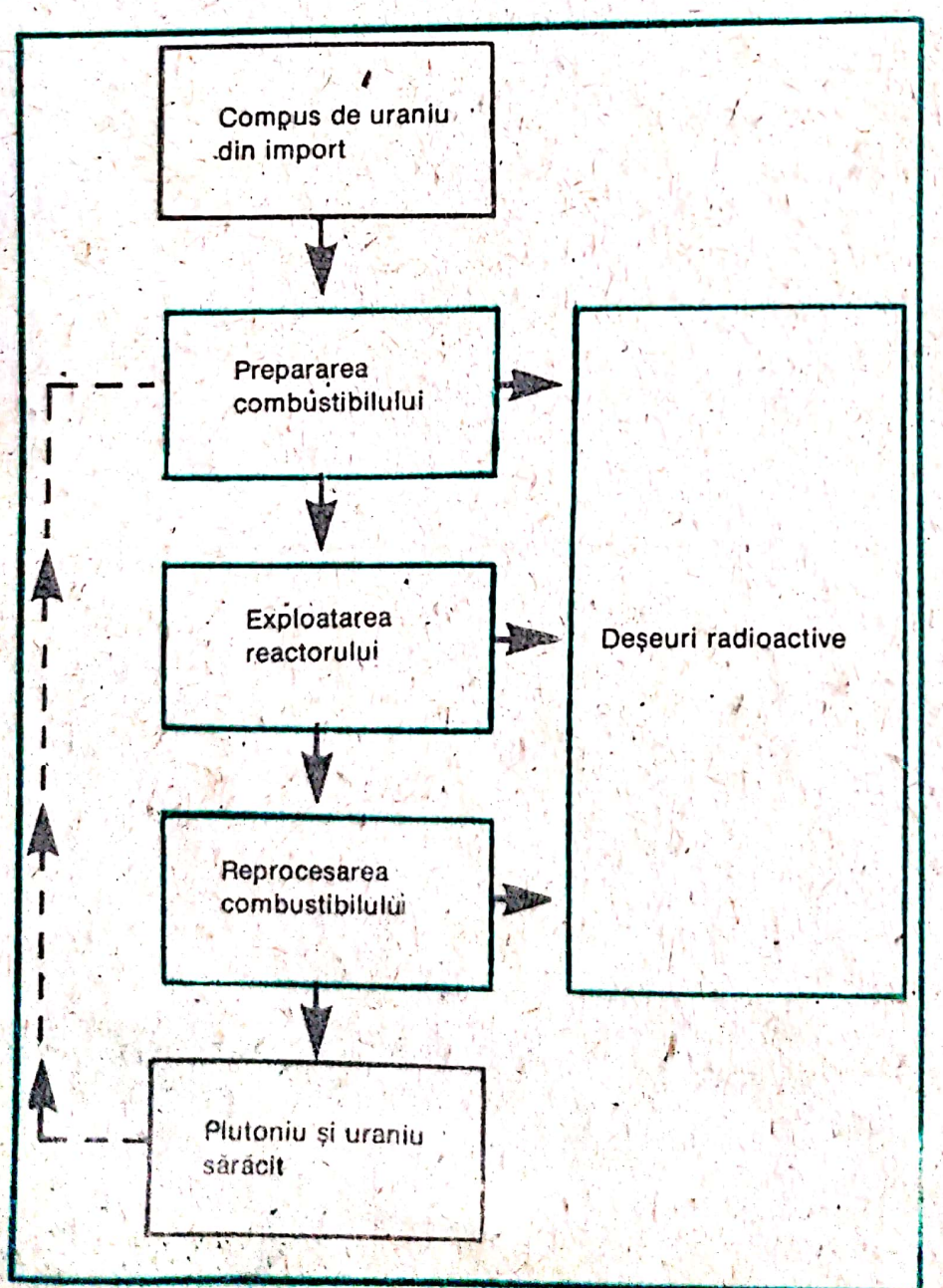


Fig. 11. Diagramă simplificată a ciclului combustibilului nuclear.

timp în reactor combustibilul este scos pentru reprocesare. În fiecare din aceste etape se produc *deşeuri radioactive* (fig. 11).

În timpul reprocesării, plutoniul şi uraniul sărăcit se recuperează. Uraniul sărăcit provenit din programul AGR poate fi reciclat, iar uraniul sărăcit provenit de la reactorii Magnox, împreună cu plutoniul, se poate folosi în reactorii rapizi. În momentul cînd scriem aceste rînduri toate aceste materiale sînt stocate.

CATEGORII DE DEŞEURI

Deşeurile radioactive se pot împărţi în trei categorii mari, în funcţie de activitatea lor: deşeuri cu activitate scăzută, deşeuri cu activitate medie şi deşeuri cu activitate ridicată.

Deşeurile cu activitate scăzută constau din obiecte ca hîrtia, îmbrăcămintea şi echipamentnl de laborator folosite în zonele în care se manipulează materiale radioactive, ca şi pămînt contaminat şi moloz de construcţii. Deşeurile cu activitate intermediară includ materialele schimbătoare de ioni folosite la tratarea gazelor şi a lichidelor înainte de deversarea lor în mediu, mîlurile care se acumulează în bazinele unde se stochează combustibilul nuclear uzat înainte de reprocesare şi materiale contaminate cu plutoniu. Termenul de deşeuri cu activitate ridicată se referă în Marea Britanie numai la lichidul produs cînd se reprocesează combustibilul uzat. În ţările care nu s-au angajat în reprocesare, combustibilul însuşi este considerat ca deşeu cu activitate mare. Tabelul de mai jos ne dă o perspectivă a cantităţilor de deşeuri radioactive din fiecare categorie şi o comparaţie cu alte deşeuri, neradioactive.

Categorii de deşeuri radioactive

Deşeuri cu activitate scăzută

Diverşi radionuclizi cu timpi de înjumătăţire scurţi şi urme de radionuclizi cu timpi de înjumătăţire mari.

Deşeuri cu activitate intermediară

Cantităţi mari de produse de fisiune şi actinide cu timpi de înjumătăţire mari. Conţinut mic de energie termică. Masă solidă mare.

Deşeuri cu activitate ridicată

Cele mai multe dintre produsele de fisiune şi actinidele din ciclul combustibilului. Conţinut ridicat de energie termică. Masă solidă mică.

Scanned with OKEN Scanner

ADMINISTRAREA DEȘEURILOR

Obiectivele *administrării* (gospodăririi) *deșeurilor* radioactive constau în prelucrarea acestora în așa fel încît să fie pregătite pentru *stocare* temporară sau *permanentă* (perpetuă), iar ultima să se facă în așa fel încît să nu existe riscuri inacceptabile atît pentru generațiile prezente, cît și pentru cele viitoare. Stocarea perpetuă implică absența oricărei intenții de a mai folosi deșeurile.

În general, deșeurile cu activitate mică nu au nevoie de tratare: ele pot fi încapsulate și stocate perpetuu în mod direct fie prin îngropare la adîncimi mici în diferite locuri, fie prin imersie controlată în mare. Cele mai multe deșeuri cu activitate intermediară nu apar sub o formă convenabilă pentru o stocare directă; ele trebuie încorporate într-un material inert ca betonul, bitumul sau rășinile. O parte dintre aceste deșeuri poate fi stocată perpetuu prin scufundare în mare, dar cele mai multe deșeuri sînt stocate temporar în diferite locuri, așteptînd o decizie privind metoda cea mai bună de stocare definitivă. În prezent toate deșeurile cu activitate ridicată din Marea Britanie sînt stocate temporar, la fel cum se întîmplă și în alte țări. Deșeurile cu activitate ridicată rezultate din activitatea de reprocesare a combustibilului în Marea Britanie sînt ținute în tancuri răcite, special construite în amplasamentul Companiei Britanice de Combustibili Nucleari de la Sellafield din Cumbria. Se află în construcție o uzină de solidificare a acestor deșeuri prin încorporarea lor într-un material sticlos. Blocurile de sticlă vor fi apoi stocate pentru cîteva decenii pentru a permite răcirea lor înaintea stocarii permanente finale.

DEȘEURI CU ACTIVITATE MICĂ ȘI INTERMEDIARĂ

Deoarece nici deșeurile cu activitate mică, nici cele cu activitate intermediară nu generează cantități importante de căldură nu rezultă nici un avantaj tehnic din stocarea lor temporară pe perioade lungi de timp. Stocarea temporară prelungită înseamnă doze de radiație pentru personal și cheltuieli de exploatare care, amîndouă, pot fi evitate printr-o stocare perpetuă timpurie. Întrucît aceste deșeuri urmează să fie stocate cîndva definitiv, făcînd acest lucru mai devreme decît mai tîrziu, probabilitatea de apariție a unui risc suplimentar pentru populație este mică și astfel va conduce la o descreștere a riscului. Din aceste motive, guvernul Marii Britanii are în vedere, în momentul de față, ca deșeurile cu activitate medie și intermediară să fie stocate perpetuu îndată ce acest lucru este posibil.

În prezent, anumite deșeuri cu activitate scăzută sînt lichidate (stocate permanent) prin ardere în subteran la adîncime mică, principalul loc de lichidare fiind Drigg în Cumbria. Pînă de curînd, deșeurile cu activitate scăzută

Scanned with OKEN Scanner

care mai rămîneau și o parte din cele cu activitate intermediară erau scufundate în mare într-un loc din nord-estul Atlanticului, la 600 km de cel mai apropiat țărm. În timpul cînd scriam această lucrare scufundarea în mare a fost suspendată așteptînd rezultatul diverselor cercetări naționale și internaționale. Totuși, este clar că și dacă scufundarea în mare va continua sau nu este nevoie de a se atribui noi terenuri în Marea Britanie atît pentru deșeurile cu activitate scăzută, cît și pentru cele cu activitate intermediară. Această necesitate a fost recunoscută acum cîtva timp și în anul 1982 a fost înființat Departamentul Deșeurilor Radioactive din Industria Nucleară (Nuclear Industry Radioactive Waste Executive — NIREX), care în primul rînd să ducă la îndeplinire această sarcină.

NIREX a stabilit ca fiind necesare două tipuri de terenuri pentru stocare permanentă (sau lichidare): unul de adîncime mică pentru a primi deșeurile cu activități scăzute și altul de adîncime mare, pentru deșeurile cu activitate intermediară. Îngropările de adîncime mică vor fi probabil localizate în formații argiloase, deoarece argila are o capacitate mare de absorbție a radionuclizilor, iar vitezele de penetrare a apelor subterane prin argilă sînt foarte mici. În principiu, îngroparea deșeurilor la adîncime se poate face sau într-o mină părăsită, sau într-o cavitate subterană special construită. Pentru a asigura o comparație corectă între diferitele locații, NIREX trebuie să execute investigații geologice în diferite locații posibile pentru fiecare tip de stocare. Înainte de a se hotărî un nou loc de lichidare a deșeurilor vor avea loc discuții publice. NIREX studiază și posibilitatea stocării permanente a deșeurilor cu activitate intermediară sub platforma continentală, fie printr-un tunel cu intrarea de pe pămînt, fie în găuri forate de o platformă de foraj marin.

EVALUĂRI ALE RISCULUI

Pînă cînd investigațiile geologice nu vor fi fost făcute, nu va fi posibil să se evalueze complet riscul potențial pentru generațiile prezente și viitoare din stocarea permanentă a tuturor deșeurilor cu activitate scăzută și intermediară. Au fost, totuși, făcute evaluări pentru procedurile de stocare din prezent și din trecut și s-a efectuat un număr de studii generale privind noile tipuri de instalații de lichidare a deșeurilor în subteran, pe care le are în vedere NIREX.

Caracteristica comună a tuturor acestor studii este că ele se bazează pe procedeul modelării și se preocupă atît de probabilitatea ca deșeul să se reîntoarcă la populație, cît și de consecințele (în termenii dozei și a efectelor posibile asupra sănătății) care ar apărea în acest caz. Folosirea modelelor este necesară deoarece aproape toate deșeurile conțin anumiți radionuclizi cu timp

de viață foarte mare și nu este ușor de demonstrat, în sens direct, experimental, gradul de încredere al unei metode de stocare permanentă pe perioade în care acești radionuclizi sînt riscanți pentru om. Necesitatea de a considera atît probabilitatea ca deșeurile să se reîntoarcă la populație, cît și consecințele acestui fapt rezidă în natura metodelor de stocare definitivă. În cazul oricărei metode de stocare, în care deșeurile sînt întîi încapsulate și izolate de mediul uman, există un număr de evenimente și de procese care ar putea conduce în cele din urmă la scurgeri de radionuclizi sau ar avea un efect asupra ratelor de scurgere. Unele dintre aceste evenimente și procese au o probabilitate mare de apariție, în timp ce altele sînt foarte improbabile. De exemplu, în cazul stocării perpetue în orice formație geologică ce conține ape subterane este aproape sigur că, după o foarte lungă perioadă de timp (tipic, milioane de ani pentru stocarea la adîncime), radionuclizii vor fi aduși la suprafață de către apele subterane. Acest proces va fi foarte lent, iar dozele primite ulterior prin apa potabilă și lanțul alimentar vor fi și ele foarte mici, deoarece locul va fi fost special ales pentru a asigura că tocmai așa se va întîmpla. Există, de asemenea, o probabilitate mult mai redusă ca o modificare geologică să micșoreze drastic acest timp foarte lung. Alt exemplu al unui eveniment foarte improbabil, care ar putea conduce la scurgeri de radionuclizi din terenul de depozitare, îl constituie activitatea perturbatoare a omului în situația în care dispar datele despre poziția locului de depozitare. Pentru a obține o imagine completă a riscurilor potențiale este necesar să considerăm întregul spectru de mecanisme potențiale de scurgere, să cuantificăm probabilitățile de apariție, ca și consecințele și să estimăm incertitudinile rezultatelor obținute.

Surse de deșeuri solide în Marea Britanie

Tipul deșeului	*Cantități (tone)*	
Deșeuri radioactive cu activitate		
— scăzută	1,0	total
— intermediară	0,16	pînă în
— ridicată	0,004	anul 2 000
Deșeuri industriale ce conțin materiale periculoase	5—10 pe an	
Reziduuri din minele de cărbuni	50 pe an	
Gunoaie (Anglia și Țara Galilor)	20 pe an	

Sursă: al 5-lea raport al Comitetului Consultativ pentru Administrarea Deșeurilor Radioactive și al Comisiei Regale asupra Poluării Mediului.

Imaginea generală ce se desprinde din toate aceste studii este că în prezent și în viitor riscurile pentru populație din partea stocărilor permanente ale deșeurilor cu activitate scăzută sau intermediară sînt într-adevăr foarte mici. De asemenea este clar că tehnologia de stocare permanentă a deșeurilor care sînt acum în așteptare există, după cum există și posibilitatea de a face

Scanned with OKEN Scanner

evaluări ale riscului, necesare înainte de a se lua o decizie privind stocările viitoare. Această schemă trebuie să fie acum suplimentată cu informații detaliate asupra locurilor posibile de depozitare. Cînd se va fi obținut și acest lucru, va fi posibil să se decidă exact cum și unde va avea loc stocarea permanentă a unui tip anumit de deșeu cu activitate scăzută sau intermediară.

DEȘEURI CU ACTIVITATE RIDICATĂ

Deșeurile cu activitate ridicată produse la reprocesarea combustibilului uzat conțin peste 95% din activitatea întregului ciclu al combustibilului nuclear. O dată solidificate, deșeurile trebuie depozitate timp de secole, cu răcire corespunzătoare, supraveghere și renovare periodică a clădirilor de depozitare. Totuși, timpi așa de lungi de depozitare vor impune o povară asupra generațiilor viitoare și va exista chiar și un risc, deși foarte mic, al unor scurgeri accidentale. Din aceste motive în toate țările care au un program nuclear se desfășoară în mod activ cercetări asupra metodelor posibile de lichidare a deșeurilor cu activitate foarte mare. Deși la început au fost luate în considerare un număr mare de opțiuni privind stocarea permanentă, acum numai două se mai bucură de o atenție specială. Acestea sînt depozitarea în formații geologice de mare adîncime la nivelul uscatului și amplasarea sub fundul adînc al oceanului. Pe plan mondial cel mai mare efort este dedicat depozitării pe uscat și există un schimb de informații considerabil între toate țările interesate. Există, totuși, și un substanțial program de cercetări, coordonat la nivel internațional, privind stocarea sub fundul mării. Marea Britanie studiază ambele opțiuni, dar în prezent contribuția cea mai mare a Marii Britanii este la programul de stocări submarine. Guvernul britanic a decis să amîne propriul său program de lucru asupra stocării în sol a deșeurilor cu activitate mare.

Tipurile de formații geologice studiate pe plan internațional în scopul stocării deșeurilor cu activitate mare includ depozite de sare, granit și argilă. Sarea este apreciată deoarece este uscată; granitul și argila sînt umede, dar se pot găsi formații unde vitezele de curgere a apelor subterane sînt foarte mici, iar atît argila cît și granitul au capacitatea de a absorbi radionuclizii. Cele mai multe proiecte de depozite au în vedere tunele din care se forează în jos găuri, unde ar fi plasate containerele cu deșeuri. Adîncimile de stocare avute în vedere sînt, în general, peste 500 m, iar spațiile dintre găuri sînt determinate de necesitatea de a limita încălzirea rocii. O dată ce s-a umplut depozitul, găurile, tunelurile și rampele de acces vor fi umplute la loc și sigilate (betonate).

Stocarea submarină are în vedere îngroparea containerelor în sedimentele de pe fundul Atlanticului, unde adîncimea medie a apei este de circa 5 000 m.

Scanned with OKEN Scanner

Se poate realiza o îngropare mai la suprafață, sub zeci de metri de sediment, plasînd containerele în dispozitive de forma unor torpile ce sînt lăsate să cadă liber spre fundul oceanului. Îngroparea la adîncime mai mare, sub mai mult de 100 m de sediment, necesită forarea unor găuri și reumplerea lor, fiind o operație mult mai costisitoare și mai dificilă. În interiorul sedimentelor vitezele de curgere a apelor sînt extrem de mici, iar mineralele argiloase prezente în sedimente vor absorbi cei mai mulți dintre radionuclizii care, în cele din urmă, vor scăpa din deșeuri cînd containerele se vor fi corodat.

Evaluările de risc privitoare atît la stocarea geologică, cît și la stocarea submarină ne arată că nici una dintre metode nu ar trebui eliminată din motive de protecție radiologică. Este, totuși, necesară o cercetare specifică a locurilor de depozitare, pentru a reduce incertitudinile pe care le mai prezintă modelele și datele folosite la evaluarea riscului și astfel să se ajungă în stadiul în care rezultatele să fie folosite la recomandarea unor opțiuni.

CRITERII PENTRU LUAREA DECIZIILOR

În ultimii cîțiva ani au existat discuții internaționale considerabile privind criteriile ce trebuie folosite în judecarea acceptabilității metodelor de stocare a deșeurilor din punct de vedere al protecției radiologice, precum și privind chestiunea mai largă de a obține o acceptare din partea societății a metodelor de stocare propuse. Consensul care a reieșit din aceste discuții este că protecția radiologică impune două criterii. Primul este ca nici o metodă de stocare să nu conducă la un risc individual, acum și în viitor, care să fie mai mare de un anumit nivel. Pentru stocarea în sol a deșeurilor cu activitate scăzută și intermediară, departamentele care dau autorizații (în Anglia, Departamentul Mediului Înconjurător și Ministerul Agriculturii, Pescuitului și Industriei Alimentare) au stabilit ca obiectiv un risc anual maxim de deces de 1 la 100 000, cu limitarea de 1 la 1 000 000 pentru un singur depozit. Punerea în aplicare a acestui obiectiv face ca riscul individual pentru generațiile actuale și viitoare provenind de la stocarea deșeurilor să fie extrem de mic.

Al doilea criteriu constă în aplicarea principiului ca întreaga expunere la radiații să fie ținută la nivelul cel mai scăzut, ce se poate obține în mod rezonabil, luînd în considerație factorii economici și sociali. Acest principiu trebuie aplicat deciziilor ce privesc întreaga procedură de administrare a anumitor deșeuri (adică tratarea, imobilizarea, împachetarea și stocarea). Aceasta înseamnă că diferite opțiuni privind administrarea deșeurilor trebuie comparate între ele pe baza riscurilor, costurilor și a altor factori mai puțin cuantificabili, dar nu mai puțin importanți. O parte a acestei comparații este de domeniul protecției radiologice, dar se recunoaște că alți factori ar putea să domine decizia finală.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru a ajuta guvernul să adopte decizii a fost constituit Comitetul Consultativ de Administrare a Deșeurilor Radioactive (Radioactive Waste Management Advisory Committee — RWMAC), care trece în revistă toate problemele și informează guvernul prin intermediul ministrului pentru problemele mediului înconjurător. Comitetul publică un raport anual.

În ciuda îngrijorării larg manifestate de populație în legătură cu stocarea deșeurilor radioactive, rezultă acum din raporturile RWMAC că există soluții tehnice pentru stocarea permanentă (lichidarea) tuturor deșeurilor radioactive care există acum sau care vor fi produse. Problemele care au mai rămas constau în alegerea celei mai bune dintre metode și găsirea locurilor pentru zonele de depozitare. Aceste locuri, ca și autostrăzile sau marile rezervoare, nu sînt acceptate cu ușurință de comunitățile locale sau de grupurile de ecologiști. Alegerea lor îngreunează sarcina guvernului și a parlamentului.

CONSIDERAȚII SOCIALE

Este greu de prezis condițiile sociale chiar și în următorii o sută de ani. Dacă luăm istoria drept ghid, în această perioadă s-ar putea avansa în controlul bolilor maligne astfel încît pericolul potențial al radiațiilor să se reducă. Pe de altă parte, ar putea fi standarde mai stringente privind contaminarea, astfel încît practicile care azi sînt permise să fie inacceptabile în viitor. Pot apărea deplasări ale populației, se poate schimba regimul alimentar și chiar modul de viață se poate schimba în așa fel încît estimările prezentului să nu mai fie valabile. Cu siguranță că există mai multe incertitudini în modelarea condițiilor sociale decît în modelarea fenomenelor fizice menționate mai sus.

Pentru societate se pune problema ponderii pe care s-o dăm acum unei anumite probabilități matematice privitoare la un efect dăunător în viitorul îndepărtat. Această problemă nu este specifică stocării deșeurilor radioactive sau protecției radiologice, deși a fost în mod particular scoasă în evidență aici. Răspunsul cel mai etic ar fi să presupunem că actualele condiții ar persista și că daunele provocate viitoarelor generații sînt de importanță egală cu daunele provocate actualei generații, dar o astfel de soluție nu pare rezonabilă dacă luăm în considerație efectele potențiale în viitoarele secole sau milenii.

Scanned with OKEN Scanner

9 BIBLIOGRAFIE

E.J. Hall, *Radiaţiile şi viaţa*, Oxford, Pergamon Press, 1984.

J.S. Hughes, G.C. Roberts, *Expunerea la radiaţie a populaţiei Marii Britanii*, Raport 1984, NRPB-R173, HMSO, 1984.

Agenţia Internaţională pentru Energia Atomică şi Organizaţia Mondială a Sănătăţii, *Energia nucleară, mediul înconjurător şi omul*, Viena, A.I.E.A., 1982.

Recomandările Comisiei Internaţionale de Protecţie Radiologică (adoptate în 17 ianuarie 1977), Oxford, Pergamon Press, ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, 1, 3, 1977.

R.J. Pentreath, *Energia nucleară, omul şi mediul înconjurător*, Taylor and Francis, Londra, 1980.

E. Pochin, *Radiaţia nucleară: riscuri şi avantaje*, Oxford, University Press, 1983.

Comisia Regală asupra Poluării Mediului, Rapoartele şase, zece şi unsprezece, Londra, HMSO, 1976, 1984 şi 1985.

Programul Naţiunilor Unite pentru Mediul Înconjurător, *Doze de radiaţie, efecte, riscuri*, Nairobi, UNEP, 1986.

Comisia Ştiinţifică a Naţiunilor Unite asupra Efectelor Radiaţiei Atomice, *Radiaţiile ionizante: surse şi efecte biologice*, Raportul pe anul 1982. către Adunarea Generală, Organizaţia Naţiunilor Unite, New York, 1982.

Comisia Ştiinţifică a Naţiunilor Unite asupra Efectelor Radiaţiei Atomice, *Surse şi efecte ale radiaţiilor ionizante*, Raportul pe anul 1977 către Adunarea Generală, Organizaţia Naţiunilor Unite, New York, 1977.

Scanned with OKEN Scanner

10 GLOSAR

Actinide. Un grup de cincisprezece *elemente* avînd *numerele atomice* între cel al actiniului (89) și cel al lawrenciului (103) inclusiv. Toate sînt *radioactive*. Grupul include uraniul, plutoniul, americiul, curiul.

Activitate. Atributul unei anumite cantități dintr-un *radionuclid*. Descrie rata cu care are loc *dezintegrarea* acestuia. Unitate: becquerel, simbol Bq. Un Bq corespunde unei dezintegrări pe secundă.

Administrarea deșeurilor. Controlul *deșeurilor radioactive* de la creare pînă la *stocare permanentă*.

ADN. Acid dezoxiribonucleic. Compusul ce controlează structura și funcția celulelor și constituie suportul material al eredității.

Armă nucleară. Dispozitiv exploziv a cărui energie provine de la *fisiunea* sau de la *fuziunea* nucleelor, ori de la amîndouă.

Atom. Cea mai mică entitate dintr-un *element* ce se poate combina chimic cu alți atomi.

Becquerel. Vezi *activitate*.

Cădere radioactivă. Transferul, din atmosferă pe pămînt, a *radionuclizilor* produși de *exploziile nucleare*. Materialul transferat.

Contor cu scintilație. Dispozitiv care conține un material ce emite pulsuri de lumină atunci cînd este expus la *radiația ionizantă*. Pulsurile de lumină sînt convertite în impulsuri electrice și numărate. Numărul de impulsuri este legat de *doză*.

Contor Geiger. Tub de sticlă sau de metal care conține un gaz la presiune joasă și doi electrozi. *Radiația ionizantă* provoacă o descărcare ce este înregistrată de un numărător sub forma unui impuls electric. Numărul de impulsuri este proporțional cu *doza*.

Cromozom. Bastonașe din nucleul fiecărei celule a corpului. Ele conțin *gene* sau elementele eredității.

Scanned with OKEN Scanner

Deşeuri radioactive. Material nefolositor conţinînd *radionuclizi.* În mod frecvent, în *industria energetică nucleară* sînt împărţite pe categorii, în funcţie de *activitate* şi de alte criterii prezentate în capitolul 8, ca avînd activitate slabă, activitate medie şi activitate mare.

Dezintegrare. Transformare spontană a unui *radionuclid.* Descreşterea *activităţii* unei substanţe radioactive.

Doză. Termen general pentru cantitatea de *radiaţie.* Vezi *doza absorbită, echivalentul dozei, echivalentul dozei efectiv, echivalentul dozei efectiv colectiv. doză semnificativă genetic.* Se utilizează frecvent pentru echivalentul dozei.
Doză absorbită. Energia cedată de *radiaţia ionizantă* unităţii de masă a unei substanţe, cum ar fi un ţesut. Unitate de măsură: gray, simbol Gy.1 Gy = = 1 joule pe kilogram.

Doză colectivă. Se foloseşte frecvent pentru *echivalentul dozei efectiv colectiv.*
Doză semnificativă genetic. *Doza* care, dacă ar fi primită de fiecare individ în parte, ar produce aceleaşi tare genetice (ereditare) ca şi doza primită în mod efectiv de diferiţii indivizi. Se exprimă în sievert, simbol Sv — unitatea pentru *echivalentul dozei.*

Echivalentul dozei. Mărimea obţinută prin multiplicarea *dozei absorbite* cu un factor ce ţine cont de posibilitatea diferită a unei radiaţii sau a alteia de a produce diferite defecte ţesuturilor. Unitate: sievert, simbol Sv. Pentru radiaţii gamma, X şi pentru particule beta factorul este 1, iar pentru particule alfa 20.

Echivalentul efectiv al dozei. Mărime obţinută prin înmulţirea dozelor echivalente primite de diferite ţesuturi cu ponderea asociată factorilor de risc corespunzători şi sumarea acestor factori. Se exprimă în sievert, simbol Sv. Ponderile factorilor de risc sînt tabelate în capitolul 2. Este prescurtată frecvent *doză.*

Echivalentul dozei efectiv colectiv. Mărime obţinută prin înmulţirea *echivalentului dozei efectiv mediu* cu numărul de persoane expuse unei anumite surse de radiaţii. Se exprimă în sievert-om, simbol Sv-om. Se prescurtează frecvent sub forma *doză colectivă.*

Electron. Particulă elementară cu masă mică (1/1836 din aceea a *protonului)* şi sarcină electrică negativă unitate. Mai există şi electroni încărcaţi pozitiv, numiţi pozitroni. Vezi *particule beta.*

Electron-volt. Unitate de energie folosită în fizica radiaţiilor. Echivalentul energiei cîştigate de un electron cînd străbate o diferenţă de potenţial de un volt. Simbol eV. 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule, aproximativ.

Element. Substanţă cu toţi *atomii* avînd acelaşi *număr atomic.*

Scanned with OKEN Scanner

Emulsie nucleară. Emulsie fotografică sensibilă la *radiația ionizantă*. Gradul de înnegrire este legat de *doză*.

Energie nucleară. Energie obținută prin funcționarea unui *reactor nuclear*. În text se referă la energia electrică rezultată.

Excitare. Proces prin care *radiația* cedează energie unui *atom* sau unei *molecule* fără să le provoace *ionizarea*. Energia se disipează în țesut sub formă de căldură.

Factor de risc. *Probabilitatea* apariției cancerului sau a leucemiei, ori a unor tare ereditare pe unitatea de *echivalent al dozei*. În mod obișnuit se referă la bolile maligne fatale sau la tarele ereditare serioase. Unitatea de măsură Sv^{-1}.

Fisiune. Fisiune nucleară: proces în care un *nucleu* este „spart" în două sau mai multe fragmente, cu eliberare de energie. În mod frecvent se referă la despicarea nucleului de uraniu-235 în două părți aproximativ egale prin bombardarea cu *neutroni termici* și cu eliberarea altor *neutroni*.

Fuziune. Fuziune termonucleară: proces în care două sau mai multe *nuclee* ușoare se combină într-un nucleu mai greu, cu eliberare de energie.

Gene. Unități biologice ale eredității. Sînt aranjate de-a lungul cromozomilor.

Gray. Vezi *doza absorbită*.

Industria energeticii nucleare. Industrie legată de producerea *energiei nucleare*. În Marea Britanie: prepararea combustibilului pentru *reactorii nucleari*, funcționarea reactorilor, reprocesarea ulterioară a combustibilului și *stocarea permanentă* a *deșeurilor radioactive*.

Interacție electrică (coulombiană, electrostatică). Forță de respingere acționînd între sarcini electrice de același semn sau forță de atracție acționînd între sarcini electrice de semne contrare.

Ion. *Atom* sau grup de atomi cu sarcină electrică netă.

Ionizare. Proces prin care un *atom* neutru sau o *moleculă* dobîndește sarcină electrică. Producere de *ioni*.

Izotop. *Nuclizi* cu același număr de *protoni*, dar cu un număr diferit de *neutroni*. Nu este sinonim pentru nuclid.

Modelare. În legătură cu *stocarea permanentă* (definitivă, perpetuă) *a deșeurilor radioactive;* descrie în termeni cantitativi procesele fizice care influențează mișcarea *radionuclizilor* prin mediu.

Moderator. Material folosit în *reactorii nucleari* pentru a reduce energia și viteza *neutronilor* produși în procesul de *fisiune*.

Scanned with OKEN Scanner

Moleculă. Cea mai mică parte dintr-o substanţă care poate exista de sine *stătător* şi care menţine proprietăţile substanţei date.

Mutaţie. Modificare chimică în *ADN*-ul *nucleului celulei*. Mutaţiile care apar în spermatozoizi sau în ovule, ori în precursorii lor, pot conduce la defecte moştenite de copii. Mutaţiile care apar în celulele corpului pot conduce la efecte asupra organismului.

Neutron. Particulă elementară cu masa atomică apropiată de unitate şi fără sarcină electrică.

Neutroni rapizi. În mod convenţional, *neutroni* cu energii mai mari de 0,1 MeV. Corespund unor viteze în jurul a $4 \cdot 10^6$ m·s^{-1}.

Neutroni termici. *Neutroni* care au fost încetiniţi într-atît încît au aceeaşi energie termică medie ca şi *atomii* sau *moleculele* printre care trec. Energia medie a neutronilor la temperatura obişnuită este de aproximativ 0,025 eV, corespunzînd unei viteze medii de $2{,}2 \cdot 10^3$ m·s^{-1}.

Nucleu. Miezul unui *atom*, ocupînd o mică parte din volumul acestuia, conţinînd cea mai mare parte din masa atomului şi avînd sarcină electrică pozitivă.

Nucleu celular. Centrul unităţii de bază a ţesutului. Conţine substanţa importantă *ADN*.

Nuclid. Specie de *atom* caracterizată prin numărul de *protoni* şi *neutroni* şi, în unele cazuri, prin starea energetică a *nucleului*.

Număr atomic. Numărul de *protoni* din *nucleul* unui *atom*. Simbol *Z*.

Număr de masă. Numărul de *protoni* plus *neutroni* din *nucleul* unui *atom*. Simbol A.

Ordin de mărime. Denumire dată celei mai apropiate puteri a lui zece. Un factor de zece.

Particulă alfa. Particulă constînd din doi *protoni* şi doi *neutroni*. Este emisă de un radionuclid.

Particulă beta. Particulă, emisă de un *radionuclid*, identică cu *electronul* sau cu *pozitronul*, după cum sarcina electrică este negativă sau pozitivă.

Probabilitate. Şansa matematică ca un anumit eveniment să aibă loc.

Produs de dezintegrare. Un *nuclid* sau un *radionuclid* produs prin *dezintegrare*. Se poate forma direct dintr-un radionuclid sau ca rezultat al unei serii de dezintegrări succesive prin intermediul cîtorva radionuclizi.

Protecţie radiologică (protecţie contra radiaţiilor). Ştiinţa şi practica limitării daunelor provocate oamenilor de *radiaţie*.

Scanned with OKEN Scanner

Proton. Particulă elementară cu masa atomică apropiată de unitate și cu sarcină electrică pozitivă unitate.

Radiație. Procesul emiterii de particule sau de energie sub formă de unde electromagnetice. Energia radiată în acest fel. În text este adesea folosită pentru *radiația ionizantă.*

Radiație Ionizantă. Radiație care produce *ionizarea* materiei. Exemple: *particule alfa, particule beta, radiații gamma, radiații X, neutroni.*

Radiații cosmice. *Radiații ionizante* de mare energie provenind din spațiul extraterestru. La suprafața Pămîntului au o compoziție complexă.

Radiații gamma. O cantitate discretă de energie, fără masă sau sarcină, care se propagă sub formă de unde electromagnetice. Emisă de un *radionuclid.* Vezi *radiații X.*

Radiații X. O cantitate discretă de energie, fără masă sau sarcină, care se propagă sub formă de unde electromagnetice. Este emisă de o instalație de radiații X. Vezi *radiații gamma.*

Radical liber. Grupare de *atomi* care în mod normal se află în combinație cu alți atomi, dar care, cîteodată, poate exista în mod independent. În general, este foarte activ în sens chimic.

Radioactiv. Avînd *radioactivitate.*

Radioactivitate. Proprietate a *radionuclizilor* de a emite spontan *radiație ionizantă.*

Radiobiologie. Studiul efectelor *radiației ionizante* asupra ființelor vii.

Radionuclid. Nuclid *instabil* care emite *radiație ionizantă.*

Reactor avansat răcit cu gaz (AGR). Dezvoltare a *reactorului Magnox* folosind combustibil de *uraniu îmbogățit* în teci de oțel inoxidabil.

Reactor cu apă sub presiune (PWR). *Reactor termic* folosind apa atît ca *moderator,* cît și ca element de răcire. Folosește drept combustibil oxid de *uraniu îmbogățit.*

Reactor Magnox. *Reactor termic* denumit astfel după aliajul de magneziu în care este introdus combustibilul format din uraniu metalic. *Moderatorul* este din grafit, iar răcirea se face cu bioxid de carbon gazos.

Reactor nuclear. Instalație în care se produce în mod continuu *fisiunea* nucleară, printr-o reacție în lanț autoîntreținută cu ajutorul *neutronilor.* În reactorii termici fisiunea este provocată de *neutronii termici,* în reactorii rapizi de *neutronii rapizi.*

Reactori rapizi. Vezi *reactor nuclear.*

Scanned with OKEN Scanner

Reactori termici. Vezi *reactor nuclear.*

Risc. Probabilitatea unei vătămări, daune sau defect.

Sievert. Vezi *echivalentul dozei efectiv.*

Sievert-om. Vezi *echivalentul dozei efectiv colectiv.*

Stocare permanentă (definitivă, perpetuă). În legătură cu *deșeurile radioactive*: dispersarea sau plasarea în orice mediu fără intenția refolosirii.

Timp de înjumătățire. Timpul necesar ca *activitatea* unui *radionuclid* să scadă, prin *dezintegrare*, la jumătate din valoarea sa. Simbol $T_{1/2}$.

Uraniu îmbogățit. Uraniu în care conținutul de izotop de uraniu-235 a fost mărit peste valoarea sa naturală de 0,7%, în greutate.

Uraniu sărăcit. Uraniu în care conținutul în izotopul uraniu-235 este mai scăzut. Se referă la o scădere sub valoarea naturală de 0,7%, în greutate, sau la o scădere sub conținutul dorit de *uraniu îmbogățit.*

Scanned with OKEN Scanner

11 ANEXA I

NOTAȚIA PRESCURTATĂ A NUMERELOR MARI

Din cauza mărimii numerelor ce apar în protecția radiologică este adesea mult mai convenabil să le exprimăm în notația științifică prescurtată decît în cea zecimală. Aceasta presupune folosirea cifrelor semnificative în cadrul unor limite dorite și înmulțirea cu puterea lui zece corespunzătoare. Urmează exemple.

Convertirea de la notația zecimală în cea prescurtată

zecimal	*prescurtat*
1 230 000	$1{,}23 \cdot 10^6$
100 000	10^5
3 531	$3{,}53 \cdot 10^3$*
15,6	$1{,}56 \cdot 10^1$
0,239	$2{,}4 \cdot 10^{-1}$**
0,001	10^{-3}
0,000087	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$

* Cu 3 cifre semnificative. ** Cu 2 cifre semnificative.

PREFIXE

Tabel cu prefixe

Se înmulțește cu	*Prefix*	*Simbol*	*Se înmulțește cu*	*Prefix*	*Simbol*
10^1	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a

Scanned with OKEN Scanner

11 ANEXA I

NOTAȚIA PRESCURTATĂ A NUMERELOR MARI

Din cauza mărimii numerelor ce apar în protecția radiologică este adesea mult mai convenabil să le exprimăm în notația științifică prescurtată decît în cea zecimală. Aceasta presupune folosirea cifrelor semnificative în cadrul unor limite dorite și înmulțirea cu puterea lui zece corespunzătoare. Urmează exemple.

Convertirea de la notația zecimală în cea prescurtată

zecimal	*prescurtat*
1 230 000	$1{,}23 \cdot 10^{6}$
100 000	10^{5}
3 531	$3{,}53 \cdot 10^{3}$*
15,6	$1{,}56 \cdot 10^{1}$
0,239	$2{,}4 \cdot 10^{-1}$**
0,001	10^{-3}
0,000087	$8{,}7 \cdot 10^{-5}$

* Cu 3 cifre semnificative. ** Cu 2 cifre semnificative.

PREFIXE

Tabel cu prefixe

Se înmulțește cu	*Prefix*	*Simbol*	*Se înmulțește cu*	*Prefix*	*Simbol*
10^{1}	deca	da	10^{-1}	deci	d
10^{2}	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^{6}	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^{9}	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a

Scanned with OKEN Scanner

Anumite puteri ale lui zece au nume și simboluri speciale. Acestea pot fi prefixate unităților de măsură: astfel *kilo*gram, simbol *kg*, pentru 10^3 g; *mili*metru, simbol *mm*, pentru 10^{-3} m. Urmează un tabel cu prefixe.

SIMBOLURI

În protecția radiologică simbolurile se folosesc în mod extensiv. În mod uzual prin simboluri se reprezintă elementele; de exemplu, C pentru carbon, Ba pentru bariu, Pb pentru plumb ș.a.m.d. Obiceiul este de a indica numărul de masă și numărul atomic al unui anumit nuclid printr-un indice sus și un indice jos, astfel carbon-14 prin $^{14}_{6}C$, bariu-140 prin $^{140}_{56}Ba$, plumb-210 prin $^{210}_{82}Pb$ ș.a.m.d. În mod frecvent numărul atomic se omite.

Urmează un tabel cu simboluri des utilizate. Cînd simbolul unei unități este desemnat în dreapta sus cu indicele —1, se înțelege că mărimea apare la numitorul unei fracții sau că reprezintă o rată. Astfel, Sv^{-1} înseamnă pe sievert, iar $Sv \cdot h^{-1}$ înseamnă sievert pe oră.

Tabel cu simbolurile folosite uzual în protecția radiologică

Simbol	*Termenul*	*Simbol*	*Termenul*
α	particulă alfa	A	numărul de masă
β	particulă beta	eV	electron-volt
γ	radiație gamama	Bq	becquerel
e	electron	Gy	gray
p	proton	Sv	sievert
n	neutron	Sv-om	sievert-om
Z	numărul atomic	$T_{1/2}$	timp de înjumătățire

Vezi GLOSARUL pentru termenii radiologici și Anexa II pentru simbolurile unităților vechi de radiație.

Scanned with OKEN Scanner

12 ANEXA II:

Relații între unitățile de radiație vechi și noi*

Mărimea	*Unitatea veche*	*Simbol*	*Unitatea nouă*	*Simbol*	*Relația*
Activitate	curie	Ci	becquerel	Bq	1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
Doza absorbită	rad	rad	gray	Gy	1 rad = 0,01 Gy
Echivalentul dozei	rem	rem	sievert	Sv	1 rem = 0,01 Sv

* Unitățile noi folosite în această lucrare fac parte din Sistemul Internațional (SI) de unități de măsură, care este singurul sistem legal de unități de măsură în Republica Socialistă România (N.T.).

Scanned with OKEN Scanner

POSTFAȚĂ

Lucrarea de față aduce pentru cititorul din țara noastră o informație extrem de utilă și de actuală dintr-o țară cu o bogată experiență în utilizarea surselor de radiații, în energetica nucleară, ca și în activitatea de cercetare a efectelor iradierii organismului.

Valorile referitoare la dozele primite de populația insulelor britanice, prezentate în această lucrare, sînt aproximativ aceleași și pentru alte țări din Europa în care energetica nucleară a realizat progrese asemănătoare. Aceste valori sînt necesare pentru evaluarea riscului nuclear, problemă de stringentă actualitate [1]. Este interesant de comparat valorile prezentate în această lucrare cu cele din țara noastră. Iradierea produsă de sursele artificiale, se referă la iradierea suplimentară, medicală și profesională. Iradierea suplimentară, pe care o comparăm mereu cu iradierea naturală, include iradierea datorată aplicațiilor fisiunii nucleare fie sub forma exploziilor în atmosferă (încercări ale armelor nucleare), fie sub forma funcționării reactorilor nucleari sau a preparării și reprocesării combustibilului nuclear. Așa cum se arată și în lucrarea de față, exploziile nucleare în atmosferă au încetat în 1963, în urma unei convenții internaționale, dar iradierea produsă de eliberările radioactive care au avut loc în acei ani constituie o iradiere de referință, cu care s-au comparat, în timp, celelalte iradieri suplimentare și în special acelea accidentale.

Referitor la iradierea naturală, trebuie precizat că valoarea folosită în această lucrare, de 1 870 μSv pe an, este rotunjită la 2 000 μSv pe an de către Comitetul Științific al Națiunilor Unite pentru Efectele Radiațiilor Atomice (UNSCEAR). Așa cum se afirmă și în cap. 3, această valoare de referință este afectată de fluctuații mari, putînd depăși 5 000 μSv pe an pe individ în anumite regiuni ale Marii Britanii, ca și în alte țări care au regiuni bogate în zăcăminte de uraniu și toriu.

După anul 1940 utilizarea fisiunii nucleare de către om a condus la eliberări radioactive în mediul ambiant și în special în atmosferă. Aerosolii radioactivi din atmosferă pot sta la înălțimi mari luni și chiar ani înainte de a se depune pe sol. Radionuclizii care se găsesc în depunerile radioactive pe sol și cei care sînt inhalați direct sau ingerați prin alimente au produs în anul 1963 o iradiere suplimentară anuală de 430 μSv pe individ, în aproape întreaga emisferă nordică a globului pămîntesc. Iradierea suplimentară a fost mai mică în emisfera sudică deoarece majoritatea exploziilor nucleare au avut loc în emisfera nordică. Valoarea iradierii suplimentare, dată mai sus, a scăzut în anii urmă-

Scanned with OKEN Scanner

tori (v. tabelul 1) ajungînd abia în 1985 la 10 μSv (valoare dată în lucrarea de față).

Tabelul 1

Iradierea organismului în R.S. România, evaluată prin echivalentul dozei efectiv (EDE) anual individual mediu, exprimat în μSv.

Anul	IRADIEREA			
	Naturală	Suplimentară	Medicală	Profesională
1900	2 000	—	—	—
1940	2 000	—	100	—
1963	2 000	430	300	10
1964	2 000	120	300	10
1965	2 000	80	300	10
1975	2 000	20	500	20
1985	2 000	10	600	25
1986*	2 000	1 250	700	25
1987*	2 000	360	700	30
1988*	2 000	300	700	30
1989	2 000	100	700	30
1990	2 000	75	700	30

*De la 1 mai al anului curent pînă la 1 mai al anului următor.

În 1986 iradierea suplimentară a crescut în Europa, datorită accidentului nuclear de la Cernobîl. Ca urmare, doza primită de populație a fost mai mare în R.S. România decît în Marea Britamie, țara noastră fiind situată mai aproape de locul accidentului. Echivalentul dozei efectiv (EDE) individual în țara noastră s-a caracterizat printr-o valoare medie de 1 250 μSv; valorile individuale în diferite regiuni au prezentat frecvent fluctuații de la jumătate din valoarea de mai sus pînă la dublul acesteia. După ce norul radioactiv a depășit teritoriul țării noastre, produsele de fisiune, care au rămas pe sol, au migrat treptat în stratul vegetal și în sol. Iodul-131 a dispărut prin dezintegrare relativ repede, astfel încît după o lună practic a ajuns la o valoare neglijabilă, însă cesiul-137 a rămas absorbit în stratul vegetal trecînd în plante, în cantitate mai mare la prima recoltă și mai puțin în recoltele următoare. Prin alimentele de origine vegetală sau prin carnea animalelor care consumă furaje contaminate radioactiv, omul ingerează produsele de fisiune. Doza primită, extern și intern, a condus la valoarea de 360 μSv în 1987 și 300 μSv în 1988. Aceste valori au fost calculate în prealabil [2] și apoi comparate cu datele experimentale obținute prin măsurări. Întrucît calculul a fost verificat, l-am aplicat și pentru evaluarea dozei primite, externă și internă, în anii 1989 și 1990, valorile obținute fiind incluse în tabelul 1 [3]. În ceea ce privește variația în timp ne așteptăm, la fel ca în anii care au urmat maximului din 1963, ca mărimea EDE referitoare la populație, datorată iradierii suplimentare, să scadă. Este foarte posibil ca în deceniul următor această mărime să ajungă la o valoare foarte mică, adică cuprinsă între 10 și 20 μSv.

În viitor, la iradierea suplimentară va contribui, pe măsură ce energetica nucleară se va extinde în alte țări, ca și în țara noastră, și doza datorată deversă-

rilor radioactive în mediul înconjurător de către această nouă ramură industrială. Cele trei subramuri ale energeticii nucleare — prepararea combustibilului nuclear, funcționarea reactorilor nucleari și reprocesarea combustibilului nuclear — pot avea o contribuție, în medie, de pînă la 5 μSv pe individ pe an, deși valorile locale individuale pot fi mai mari, așa cum se arată în cap. 4 al lucrării de față. Ceea ce contează însă pentru prejudiciul asupra sănătății, datorat iradierii organismului, este valoarea medie raportată la întreaga populație, așa cum reiese din capitolele 4 și 5. Evaluarea dozelor primite de personalul operator sau grupuri de populație se face prin metode dozimetrice aflate în continuă perfecționare [4].

În tabelul 1 sînt date și valorile iradierii organismului datorate iradierii medicale și profesionale, în țara noastră, pe care să le comparăm cu acelea prezentate în lucrarea de față. La iradierea medicală se constată o valoare medie individuală anuală de 700 μSv față de 250 μSv în Marea Britanie. Este adevărat că valoarea de 250 μSv este o reestimare a unei valori mai mari admise în urmă cu cîțiva ani. Vechea valoare fusese evaluată cu ajutorul unei metode, utilizată și de UNSCEAR, care conducea la supraestimări. Datorită evaluării și în țara noastră după modelul UNSCEAR este posibil ca valorile iradierii medicale date în tabelul 1 să fie supraestimate. Cercetări efectuate în unele țări, ca și în Marea Britanie, au arătat calea de îmbunătățire a metodei de evaluare a iradierii medicale; o metodă mai corectă va trebui să fie însușită de UNSCEAR.

Pe de altă parte, experiența cîștigată în țările avansate, cum este și Marea Britanie, privind îmbunătățirea protecției radiologice, ne face să credem că și în țara noastră se pot reduce în anii următori valorile EDE pentru iradierea medicală și profesională. Este de așteptat ca, într-un deceniu, aceste valori să se reducă la jumătate, adică 350 μSv pentru iradierea medicală și 15 μSv pentru iradierea profesională.

Concluzia importantă a lucrării pe care o postfațăm este că cercetările actuale privind efectele biologice produse asupra organismului de către radiațiile atomice au condus la ideia că, în afara iradierii naturale, valoarea EDE admisă pentru un individ din populație este în medie 1 mSv pe an, adică jumătate din valoarea datorată iradierii naturale, în condițiile în care:

1) unii indivizi, datorită profesiei, sînt expuși unei iradieri în care EDE este 50 mSv pe an, deși în general iradierea are o valoare mai mică, practic sub jumătate;

2) unii indivizi din populație pot fi expuși unei iradieri în care EDE este 5 mSv într-un an sau doi, urmînd ca în următorii ani să fie de 1 mSv pe an.

Ca urmare, proiectarea obiectivelor nucleare trebuie să aibă în vedere un complex de măsuri de radioprotecție care să limiteze iradierea suplimentară a populației în condițiile precizate.

iulie, 1988

MIRCEA ONCESCU

Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară din Institutul Central de Fizică-București

Scanned with OKEN Scanner

BIBLIOGRAFIE

1. M. Ivaşcu, G. Ionescu, *Fizica şi problemele energiei*, Ed. Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1987 (capitolul 7: Riscul nuclear).

2. D. Galeriu, M. Oncescu, *Radioactivitatea ambiantă în R.S. România în anul 1987*, Preprint, Institutul Central de Fizică (ICEFIZ), Bucureşti, 1987,

3. D. Galeriu, M. Oncescu, *Radioactivitatea ambiantă în R.S. România în anii 1989—1990*, Preprint, Institutul Central de Fizică (ICEFIZ), Bucureşti 1988.

4. M. Oncescu, I. Panaitescu, *Dozimetria şi ecranarea radiaţiilor Roentgen şi gamma*, Ed. Acad. R.S.R., Bucureşti, 1989 (sub tipar).

Scanned with OKEN Scanner

Redactor : **Natalia Fiuciuc**
Tehnoredactor : **Dumitru Gheorghe**
Coperta : **Simona Dumitrescu**

Bun de tipar : 19.I.1989. Coli de tipar : 5
Comanda nr. 80 396

Combinatul poligrafic „Casa Scînteii",
Piața Scînteii nr. 1, București
Republica Socialistă România

ISBN 0-85951-255-X (England)
ISBN 973-31-0047-1 (Romania)

80

Scanned with OKEN Scanner

Lei 8

ISBN 973-31-0047-1

Scanned with OKEN Scanner